



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **105679** (13) **C2**
(51) МПК (2014.01)
G01S 17/36 (2006.01)
G01H 9/00
G01B 9/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

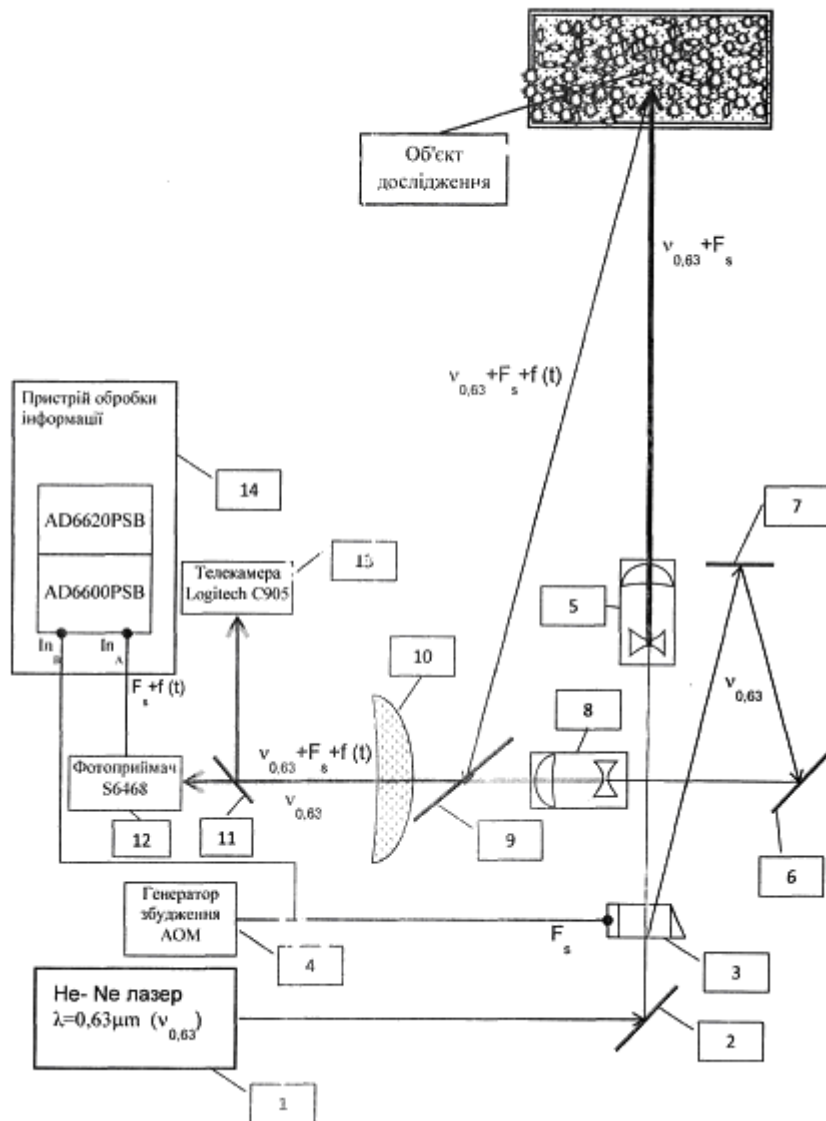
(21) Номер заявки: а 2012 08246	(72) Винахідник(и): Венгер Євген Федорович (UA), Ліптуга Анатолій Іванович (UA), Серьожкін Юрій Георгійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 05.07.2012	(73) Власник(и): ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ ІМ. В.Є. ЛАШКАРЬОВА НАН УКРАЇНИ, пр. Науки, 41, м. Київ, 03680 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 10.06.2014	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: US 4633715; 06.07.1987 US 5504719; 02.04.1996 RU 2393427 C1; 27.06.2010 US 5608166; 04.03.1997 US 2002/0024331 A1; 28.02.2002 GB 2189880 A; 04.11.1987 RU 2008100002 A; 20.07.2009 SU 1714346 A1; 23.02.1992 UA 30843 A; 15.12.2000 UA 84937 C2; 10.12.2008
(41) Публікація відомостей про заявку: 10.01.2014, Бюл.№ 1	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.06.2014, Бюл.№ 11	

(54) БІАКСІАЛЬНИЙ ЛАЗЕРНИЙ ГЕТЕРОДИННИЙ ВИМІРЮВАЧ ПЕРЕМІЩЕНЬ

(57) Реферат:

Прилад належить до вимірювальної техніки і призначений для безконтактного вимірювання величини переміщення об'єктів з нанометричною роздільною здатністю. Біаксіальний лазерний гетеродинний вимірювач переміщень об'єкта складається з оптично зв'язаних лазера, акустооптичного модулятора з можливістю формування на виході променя лазерного гетеродина та лазерний промінь, що зондує об'єкт. Також вимірювач містить світлоподільник-змішувач випромінювання лазерного гетеродина та лазерного випромінювання, розсіяного об'єктом, що переміщується, об'єктив, у фокальній площині якого знаходиться фотодетектор, електрично зв'язаний зі входом пристрою обробки інформації, та генератор збудження акустооптичного модулятора, електрично зв'язаний з акустооптичним модулятором. Для визначення величини переміщення об'єкта використовується двоканальний пристрій обробки інформації, з другим входом якого електрично зв'язано генератор збудження акустооптичного модулятора. Технічним результатом винаходу є збільшення точності вимірювання динамічних характеристик як суцільних об'єктів, так і ансамблів частинок, в тому числі і в каламутному середовищі за прозорими для лазерного випромінювання ілюмінаторами за рахунок компенсації впливу нестабільності частоти генератора.

UA 105679 C2



Прилад належить до вимірювальної техніки і призначений для безконтактного вимірювання величини переміщення об'єктів з нанометричною роздільною здатністю.

Лазерні вимірювачі переміщення, розроблені на основі гетеродинного прийому лазерного випромінювання розсіяного поверхнею досліджуваного об'єкта, не мають механічного контакту з об'єктом і забезпечують можливість дистанційного вимірювання величини його переміщення та мають високу ступінь точності.

Відомий лазерний вимірювач переміщення [1], який має напівпровідниковий лазер з фотоприймальним пристроєм, який оптично пов'язаний через коліматор з дифузно-відбиваючим об'єктом. Струм лазера модулюється по лінійному закону, завдяки цьому змінюється інтенсивність його випромінювання. Модульоване таким чином випромінювання через коліматор направляється на досліджуваний об'єкт. Розсіяне ним випромінювання потрапляє назад в активне середовище лазера, де підсилюється та інтерферує з вихідним випромінюванням. Через кінцеве значення швидкості світла розсіяне випромінювання доходить до напівпровідникового лазера з деякою затримкою. Завдяки цій затримці частота цього випромінювання не співпадає з частотою, що генерується лазером в даний момент. В результаті на виході вбудованого в напівпровідниковий лазер фотодіода виникає електричний сигнал, параметри якого несуть інформацію про рух відбиваючої поверхні об'єкта, в тому числі і про величину його переміщення.

До недоліків відомого пристрою належить віднести малу точність визначення величини переміщення об'єкта (до 8 нм), яка обумовлена його оптичною та електричною схемами та обмежені можливості при вимірюванні переміщень об'єктів у мутному розсіювальному середовищі та за роздільними прозорими екранами.

Відомий лазерний гетеродинний доплерівський вимірювач, який призначений для реєстрації звукових коливань об'єктів та середовищ, що знаходяться за ілюмінатором (прозорим роздільним екраном) [2]. Для виключення впливу розсіювання на ілюмінаторі та розсіювання на частках, які є на шляху поширення зонduючого випромінювання до об'єкта, лазерний вимірювач виконаний по біаксіальній оптичній схемі.

У біаксіальній схемі оптичні осі передавальної і приймальної каналу просторово рознесені (між передавальною і приймальною оптичними осями існує кут) і перетинаються тільки на об'єкті дослідження. Таким чином сигнал утворюється розсіянням від "точки" перетину цих осей. Це дає можливість отримувати сигнал від об'єктів, що знаходяться усередині каламутного середовища або за роздільним ілюмінатором. У разі розсіяння каламутним середовищем, сигнал формується розсіянням світла частинками, що знаходяться в об'ємі, утвореному поперечним перетином пучка у фокальній площині і глибиною різкості.

Вимірювач має лазер, світлоподільний пристрій для формування променя лазерного гетеродина, пристрій оптичної затримки, комірку Брега для зміщення частоти зонduючого променя, генератор збудження акустичної хвилі, лінзу-ілюмінатор для фокусування зонduючого променя на об'єкті у воді, світлоподільник для змішання розсіяного об'єктом випромінювання з сигналом лазерного гетеродина. Сигнал биття між розсіяним випромінюванням та лазерним гетеродином виділяється фотодетектором, підсилюється та надходить на пристрій обробки інформації.

Недоліком відомого пристрою є обмеження точності визначення переміщень досліджуваних об'єктів внаслідок нестабільності частоти випромінювання, що надходить з комірки Брега. Цей дрейф викликається нестабільністю частоти генератора збудження акустичної хвилі.

Є пристрій, що вимірює доплерівський зсув частот в умовах руху об'єкта, який розсіює лазерне випромінювання [3]. В цьому пристрої компенсація дрейфу лазерного гетеродина та дрейфу частоти зонduючого лазера виконується шляхом віднімання частот лазерного гетеродина та зонduючого лазера до виходу зонduючого випромінювання із пристрою. Цей пристрій виконаний по біаксіальній схемі, складається із лазера-передатчика, лазера-гетеродина, світлоподільника для відгалуження частини зонduючого випромінювання, світлоподільника для відгалуження частини випромінювання гетеродина, світлоподільника для змішування розсіяного випромінювання та випромінювання лазера-гетеродина, фотодетектора для виділення сигналу биття між розсіяним випромінюванням та випромінюванням лазера-гетеродина, світлоподільника для змішування випромінювання лазера-гетеродина та лазера-передатчика, частотомірів для вимірювання цих частот биття та пристрою обробки інформації для отримання різниці цих частот. Пристрій працює наступним чином. Розсіяне об'єктом випромінювання лазера передатчика змішується на світлоподільнику з випромінюванням лазера-гетеродина і сумарний світловий потік надходить на фотодетектор. На виході фотодетектора виникає сигнал биття з частотою, рівною різниці частоти лазера-гетеродина і частоти лазерного розсіяного випромінювання, рівній частоті лазера-передатчика з

доплерівським зміщенням частоти із-за руху об'єкта. Частина випромінювання лазера-гетеродина і лазера-передатчика змішується на світлоподільнику і сумарний потік надходить на другий фотодетектор. На виході цього фотодетектора виникає сигнал биття з частотою, що дорівнює різниці частот лазера-передатчика та лазера-гетеродина. Сигнали биття з фотодетекторів надходять на частотоміри, а виміряні частоти віднімаються в обчислювальному пристрої. В результаті на виході отримуємо сигнал з частотою, що дорівнює доплерівському зміщенню частот.

Недоліком даного пристрою являється те, що некорельовані шуми лазера-гетеродина і шуми лазера-передатчика додаються, а це приводить до зменшення чутливості пристрою і, як наслідок, до зменшення точності визначення переміщень об'єктів.

Найбільш близьким по технічній суті до рішення, що пропонується, є лазерний гетеродинний вимірювач переміщень [4]. Вимірювач виконаний по біаксіальній схемі. Лазерний гетеродинний вимірювач переміщень містить: лазер, акустооптичний модулятор, на виході якого формуються промені гетеродина і зсунутий по частоті промінь, що зондує, генератор збудження акустооптичного модулятора, об'єктив, дзеркало, що відбиває розсіяне випромінювання, світлоподільник-змішувач, на якому зміщуються розсіяне випромінювання та випромінювання оптичного гетеродина, два дзеркала, що направляють промінь оптичного гетеродина на світлоподільник-змішувач, фотодетектор та пристрій обробки інформації.

Лазерний промінь надходить на акустооптичний модулятор, в якому збуджується акустична хвиля з частотою F_s за допомогою генератора збудження. Із лазерного випромінювання, що продифраговало на акустичній хвилі та змінило свою частоту на величину F_s , формується зондуючий промінь. Із лазерного випромінювання, яке не змінило свою частоту, формується випромінювання лазерного гетеродина. Зондуючий промінь направляється через фокусуючу оптику на розсіюючий об'єкт. Розсіяне випромінювання через фокусуючу оптику попадає на дзеркало, а потім на світлоподільник-змішувач, на якому воно змішується з незміщеною по частоті частиною випромінювання лазерного гетеродина. Потім розсіяне випромінювання та випромінювання лазерного гетеродина надходить на фотоприймач.

Інформаційним сигналом є змінна складова струму фотоприймача, що утворюється при інтерференції випромінювання лазерного гетеродина і розсіяного випромінювання. Цей сигнал є фазомодульованим сигналом. Модуляція фази залежить від параметрів руху поверхні, що розсіює. Інформацію про динамічні характеристики об'єкта, що розсіює отримують за допомогою фазової демодуляції із змінної складової фотоструму.

До переваг прототипу слід віднести формування випромінювання лазерного гетеродина та зондуючого випромінювання з одного лазера, що значно зменшує вплив нестабільності частоти лазера та флуктацій потужності лазера на результати вимірювань.

Недоліком прототипу є обмеження чутливості вимірювача переміщень нестабільністю частоти зондуючого випромінювання, що викликається нестабільністю частоти генератора збудження акустооптичного модулятора, що в кінцевому результаті призводить до зменшення точності визначення переміщень об'єктів.

В запропонованому винаході вирішується задача створення біаксіального лазерного гетеродинного вимірювача переміщень, який збільшить точність вимірювання динамічних характеристик, як суцільних об'єктів так і ансамблів частинок, в тому числі і в каламутному середовищі за прозорими для лазерного випромінювання ілюмінаторами.

Поставлена задача вирішується тим, що в біаксіальному лазерному гетеродинному вимірювачі переміщень об'єкта, що складається з оптично зв'язаних лазера, акустооптичного модулятора, на виході якого формуються промінь лазерного гетеродина та лазерний промінь, що зондує об'єкт, світлоподільника-змішувача випромінювання лазерного гетеродина та лазерного випромінювання, розсіяного об'єктом, що переміщується, об'єктива, у фокальній площині якого знаходиться фотодетектор, електрично зв'язаний зі входом пристрою обробки інформації, та генератора збудження акустооптичного модулятора, електрично зв'язаного з акустооптичним модулятором, пристрій обробки інформації, який використовується для обчислювання величини переміщення об'єкта є двоканальний, з другим входом якого електрично зв'язано генератор збудження акустооптичного модулятора.

Іншими словами, задача збільшення чутливості пристрою і точності вимірювання вирішується завдяки тому, що в біаксіальному лазерному гетеродинному вимірювачі переміщень вплив нестабільності частоти генератора, що збуджує акустооптичний модулятор, зменшується введенням сигналу з генератора на другий вхід двоканального пристрою обробки інформації (фазомодульований сигнал биття, що знімається з фотоприймача, потрапляє на перший вхід пристрою обробки інформації).

Структурна схема приладу представлена на кресленні. Пропонований прилад для вимірювання мікро-нанопереміщень об'єктів містить:

- 1 - лазер,
- 2 - дзеркало,
- 5 3 - акустооптичний модулятор,
- 4 - генератор збудження акустооптичного модулятора,
- 5 - розширювач променя, що зондує,
- 6, 7 - дзеркала
- 8 - розширювач променя гетеродина,
- 10 9 - світлоподільник-змішувач,
- 10 - об'єктив,
- 11 - світлоподільник,
- 12 - фотоприймач,
- 13 - телекамера,
- 15 14 - пристрій обробки інформації.

Прилад працює наступним чином

Випромінювання лазера 1 падає на дзеркало 2. Відбите випромінювання, проходячи через акустооптичний модулятор 3, дифрагує на акустичній хвилі, що збуджується на частоті F_s за допомогою генератора збудження 4. Продифрагована частина лазерного випромінювання

20 зміщується по частоті на величину F_s та потрапляє на розширювач пучка 5. Зміною відстані між лінзами розширювача проводиться фокусування лазерного випромінювання на об'єкт дослідження. Проходячи через акустооптичний модулятор 3, частина випромінювання не дифрагує на акустичній хвилі та не змінює частоту. З цього випромінювання за допомогою дзеркал 6, 7 та розширювача пучка 8 формується промінь, який є променем гетеродина. Зміною

25 відстані між лінзами розширювача 8 проводиться узгодження хвильових фронтів випромінювання гетеродина і випромінювання, розсіяного об'єктом дослідження. Промінь гетеродина надходить на світлоподільник-змішувач 9. Та частина випромінювання гетеродина, яка пройшла скрізь світлоподільник-змішувач 9, спрямовується разом з частиною розсіяного об'єктом випромінювання, відбитого від світлоподільника-змішувача 9, на приймальний об'єктив

30 10. Змішаний потік розсіяного випромінювання та випромінювання лазерного гетеродина поділяється за допомогою світлоподільника 11 на дві частини. Частина, що пройшла скрізь світлоподільник 11, попадає на фотоприймач 12, який знаходиться в фокальній площині приймального об'єктива 10. Частина, відбита від світлоподільника 11, надходить на телекамеру 13. На матриці телекамери 13 формується зображення досліджуваного об'єкта з сфокусованим зондуючим променем та плямою випромінювання гетеродина, яке також сфокусовано на матриці телекамери 13. Матриця телекамери 13 встановлена таким чином, що пляма випромінювання гетеродина знаходиться у центрі матриці. Поєднання на площинці фотоприймача плями гетеродина з плямою розсіяного об'єктом випромінювання проводиться поворотом світлоподільника-змішувача 9. Змінна складова струму фотоприймача 12, що

40 утворюється при інтерференції випромінювання лазерного гетеродина і розсіяного випромінювання, є інформаційним сигналом. Цей сигнал є фазомодульованим сигналом. Модуляція фази залежить від параметрів руху поверхні, що розсіює. Фазомодульований сигнал надходить на вхід А двоканального пристрою обробки інформації. На вхід В пристрою обробки інформації 14 надходить сигнал з генератора збудження 4. В пристрої обробки інформації 14 формуються квадратурні компоненти вхідного сигналу та сигналу генератора збудження 4 і по паралельному порту передаються в комп'ютер для квадратурної демодуляції сигналу, тобто відновлення зміни фази вхідних сигналів. Обидва сигнали обробляються за однаковим алгоритмом. Кінцевий результат обробки є різниця двох сигналів. Інформація про величину і швидкість зміни фази, а, отже, і про зсув і швидкість поверхні, що розсіює, виділяється за

50 допомогою обчислення модифікованої функції $\arctg2$ відношення синфазної і квадратурної компонент фазомодульованого сигналів.

Відзначимо, що частина елементів пропонованого приладу на кресленні, а саме: дзеркало 2, розширювач пучка 5, дзеркала 6, 7, розширювач пучка 8, світлоподільник 11 та телекамера 13, не визначають технічну суть винаходу, і є, як правило, завжди присутніми у приладах цього

55 типу, тому не вказані в формулі винаходу.

Приклад реалізації

Реалізація винаходу дає можливість вимірювання мікро-нанопереміщень практично будь-яких поверхонь та ансамблів нано-мікрочасток в умовах, які раніше обмежували застосування лазерних вимірювачів (вакуумних установках, камерах високого тиску, об'ємах з агресивними середовищами). Надвисока чутливість пропонованого приладу відкриває перспективу

60

діагностики складу прозорих та мутних газів і рідин, полум'я та продуктів згорання. Можливість вимірювання короточасних мікро-нанопереміщень об'єкта внаслідок імпульсних лазерних впливів на нього є важливою технологічною складовою при розробці нових методів генерації та прискорення газополум'яних потоків (лазерні ракетні мікродвигуни, плазмово-лазерні інжектори, плазмово-пучкові технології).

Слід зазначити, що найбільший ефект реалізація винаходу дає під час вимірювання переміщень з малою швидкістю. Насамперед це має значення в дослідженні біологічних об'єктів. А саме вимірювання коливань об'єктів з частотами 10...1 Гц за допомогою пропонованого приладу показує, що відношення сигнал/шум після операції віднімання покращується на 10-15 дБ.

Випромінювання лазера (ЛГН-207, довжина хвилі 0,63 мкм, потужність 2,5 мВт) падає на дзеркало, розташоване під кутом 45° до променя лазера. Проходячи через акустооптичний модулятор, випромінювання дифрагує на акустичній хвилі, що збуджується на частоті $F_s=80$ МГц за допомогою кварцового генератора збудження. Продифрагована частина лазерного випромінювання (80...90 %) зміщується по частоті на 80 МГц. З цього випромінювання за допомогою розширювача пучка з коефіцієнтом розширення 10х формується лазерний промінь, що зондує. Зміною відстані між лінзами розширювача пучка проводиться фокусування лазерного випромінювання на об'єкт.

З випромінювання, що пройшло крізь акустооптичний модулятор та не змінило частоту, формується промінь лазерного гетеродина. Випромінювання лазерного гетеродина потрапляє на розширювач пучка з коефіцієнтом розширення 15х. Зміною відстані між лінзами розширювача проводиться узгодження хвильових фронтів випромінювання лазерного гетеродина і розсіяного об'єктом випромінювання.

Випромінювання лазерного гетеродина і розсіяне об'єктом випромінювання перетинаються на світлоподільнику-змішувачу з коефіцієнтом пропускання близько 20 %. Відбите світлоподільником-змішувачем розсіяне об'єктом випромінювання і випромінювання лазерного гетеродина, що пройшло крізь пластину, потрапляють на об'єкти Sigma 18-200mm F3.5-6.3 DC, у фокальній площині якого знаходиться фотоприймач S6468 Hamamatsu. Поєднання на площинці фотоприймача плями гетеродина з плямою розсіяного об'єктом випромінювання проводиться поворотом світлоподільника-змішувача, встановленого на двокоординатний привід, що складається з двох п'єзодвигунів. Мінімальний кут повороту не більше 3...4 кутових секунд. Контроль поєднання і вибір точки спостереження на поверхні об'єкту здійснюється за допомогою телекамери Logitech C905 по частині сумарного світлового потоку (випромінювання гетеродина, розсіяне випромінювання, зображення об'єкта), відгалуженого світлоподільною пластиною. Поєднання проводиться при зменшеній, приблизно, в 10^5 разів потужності лазерного гетеродина. Після поєднання проводиться збільшення потужності лазерного гетеродина до робочого значення близько 50 мВт.

Змінна складова струму фотоприймача при лазерному гетеродинаванні випромінювання, розсіяного рухомою поверхнею залежить від зміни фази розсіяного випромінювання відносно випромінювання лазерного гетеродина внаслідок руху поверхні, що розсіює, та внаслідок нестабільності частоти генератора збудження акустооптичного модулятора.

Сигнал з виходу фотоприймача потрапляє на вхід А аналого-цифрового перетворювача AD6600PSB у складі двоканального пристрою обробки інформації. На вхід В потрапляє сигнал з кварцового генератора, що збуджує акустооптичний модулятор.

AD6600PSB є двоканальним аналого-цифровим перетворювачем з керованим коефіцієнтом підсилення і частотою перетворення до 250 МГц. З нього цифровані сигнали коди надходять на цифровий приймач AD6620PSB. Найважливішими функціями AD6620PSB є формування квадратурних компонент, цифрове гетеродинавання, швидкісна децимація і цифрова фільтрація. Квадратурні компоненти вхідних сигналів по паралельному порту передаються в комп'ютер для квадратурної демодуляції сигналу, тобто відновлення зміни фази вхідних сигналів. Інформація про величину і швидкість зміни фази, а, отже, і про зсув і швидкість розсіюючої поверхні виділяється за допомогою обчислення модифікованої функції $\arctg2$ відношення синфазної і квадратурної компонент фазомодульованого сигналу.

При цьому необхідно заздалегідь відкалібрувати вимірювальний тракт вимірювача по величині спектральних складових сигналу з фотоприймача під час коливань об'єкта з відомою частотою. Такі спектри отримуються за допомогою тестових програм "AD6620 Monitor", які реалізують функції аналізатора спектра. Визначення амплітуди коливань із спектру сигналу, отриманого при розсіюванні від поверхні, що коливається, характеризується двома випадками:

амплітуда коливань менше $\lambda/8$ (80 нм);

амплітуда коливань більше $\lambda/8$.

У першому випадку амплітуда коливань обчислюється шляхом порівняння амплітуди відгуку на частоті коливань поверхні з амплітудою відгуку на нульовій частоті (цей відгук відповідає зміні фази, еквівалентній зміні фази при коливаннях з амплітудою $\lambda/8$). У другому випадку амплітуду коливань з відомою частотою можна обчислити з ширини спектра, що утворюється при багаторазовому проходженні об'єкта, що коливається, через величину $\lambda/8$.

У процесі калібровки обчислювалась зміна фази розсіяного випромінювання відносно випромінювання лазерного гетеродина під час коливань об'єкта на відому величину. Далі величина переміщень об'єкта обчислювалась по сумарному змінюванню фази під час руху об'єкта. Кінцевою стадією обчислення було віднімання обчисленого по аналогічному алгоритму змінювання фази сигналу з генератора збудження акустооптичного модулятора із величини переміщення об'єкта, яка була здобута після фазової демодуляції сигналу з фотоприймача.

Дослідження за допомогою пропонованого біаксіального лазерного вимірювача переміщень коливань та переміщень різних об'єктів, а саме суцільних поверхонь, ансамблів наномікрочасток, біологічних об'єктів показують, що в залежності від швидкості руху об'єкта, часу виміру, відстані до об'єкта та його альбедо, прилад дозволяє реєструвати коливання в діапазоні 0,3...100 нм з відношенням сигнал/шум 10 дБ, а переміщення від 1 нм до 100 нм.

Джерела інформації:

1. Патент RU 2393427 C1, 30.03.2009.

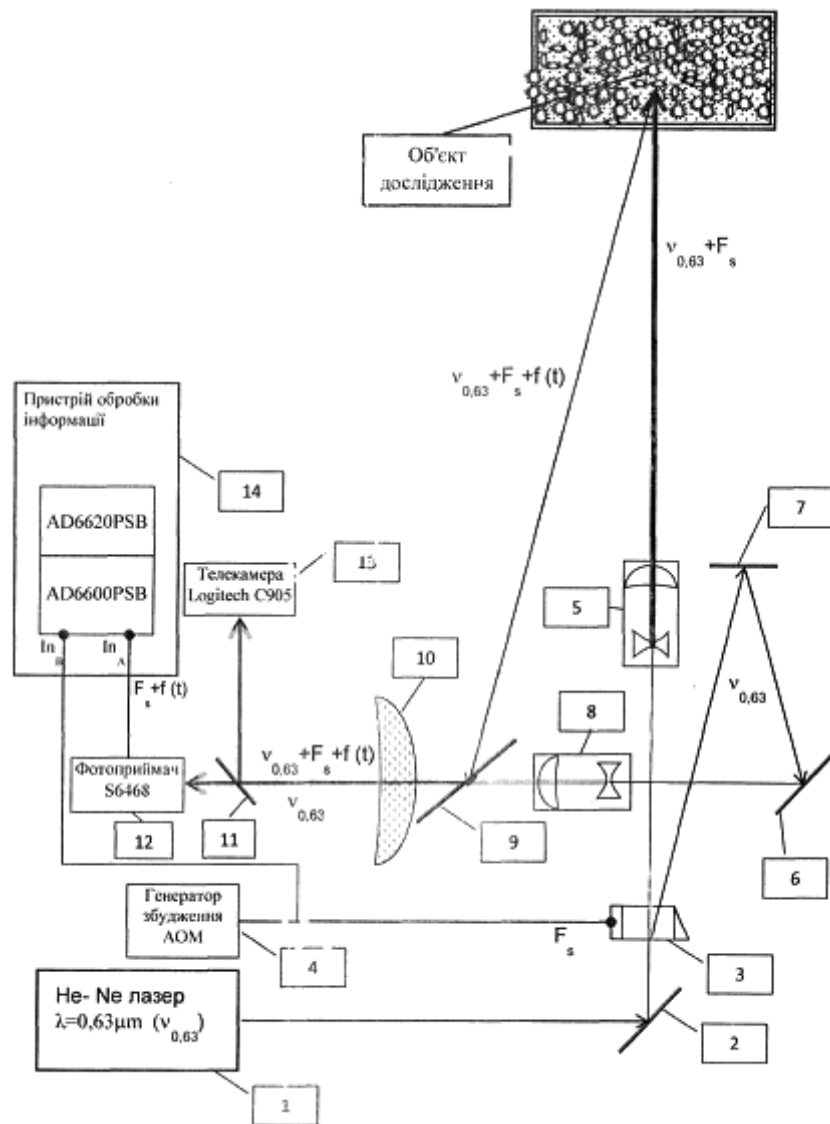
2. Патент US 5,504,719 Apr. 2, 1996.

3. Протопопов В.В., Устинов Н.Д. Лазерное гетеродинирование. - М.: Наука, 1985. - С. 142.

4. Патент US 4,633,715 Jan. 6, 1987.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Біаксіальний лазерний гетеродинний вимірювач переміщень об'єкта, що складається з оптично зв'язаних лазера, акустооптичного модулятора, виконаного з можливістю формування на виході променя лазерного гетеродина для зондування об'єкта, світлоподільника-змішувача випромінювання лазерного гетеродина, об'єктива, у фокальній площині якого знаходиться фотодетектор, електрично зв'язаний з входом пристрою обробки інформації, та генератора збудження акустооптичного модулятора, електрично зв'язаного з акустооптичним модулятором, який **відрізняється** тим, що пристрій обробки інформації використано двоканальний, з другим входом якого електрично зв'язано генератор збудження акустооптичного модулятора.



Комп'ютерна верстка Л. Литвиненко

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601