



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т. 21, вып. 2. С. 157–164
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2021, vol. 21, iss. 2, pp. 157–164

Научная статья
УДК 531.715.1
<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-2-157-164>

Измерения наносмещений частотно-модулированным лазерным автодином



С. Ю. Добдин, А. В. Джафаров, М. П. Щедринов, М. Г. Инкин, Ан. В. Скрипаль 

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Добдин Сергей Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твёрдого тела, dobdinsy@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0801-4664>

Джафаров Алексей Владимирович, аспирант кафедры медицинской физики, jafaralex@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0588-3151>

Щедринов Максим Петрович, магистрант кафедры медицинской физики, shedrinovmp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0943-0691>

Инкин Максим Глебович, аспирант кафедры общей физики, sunbeam18.95@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1580-5413>

Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой медицинской физики, skripalav@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>

Аннотация. В работе представлен метод измерения наносмещений отражающей поверхности при частотной модуляции лазерного автодина по треугольному закону. Рассматривается случай учета изменения фазы во внешнем резонаторе лазерного автодина и спектрального представления автодинного сигнала. Показано, что на расстояниях от активной среды лазерного автодина до отражающей поверхности, на которых выполняется условие равенства целого количества полуволн длине внешнего резонатора как на нижней, так и верхней границах диапазона девиации длины волны лазерного диода, наблюдается линейная зависимость амплитуд спектральных составляющих от величины наносмещений поверхности. Измерения спектров автодинного сигнала проведены на лазерном диоде на квантоворазмерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой. Показано, что изменением величины девиации длины волны лазерного диода может быть достигнута 10 нм точность измерения смещения поверхности при измерении спектральных составляющих сигнала автодина с точностью 10%.

Ключевые слова: лазерный автодин, лазерная интерферометрия, полупроводниковый лазер, частотная модуляция, нанопрофилометрия, спектральный анализ, измерение наносмещений

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-00122).

Для цитирования: Добдин С. Ю., Джафаров А. В., Щедринов М. П., Инкин М. Г., Скрипаль Ан. В. Измерения наносмещений частотно-модулированным лазерным автодином // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т. 21, вып. 2. С. 157–164. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-2-157-164>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Article
<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-2-157-164>

Nanodisplacement measurements by frequency-modulated laser autodyne

S. Yu. Dobdin, A. V. Dzharafarov, M. P. Shchedrin, M. G. Inkin, An. V. Skripal 

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Sergey Yu. Dobdin, dobdinsy@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0801-4664>

Aleksey V. Dzharafarov, jafaralex@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0588-3151>

Maxim P. Shchedrin, shedrinovmp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0943-0691>

Maxim G. Inkin, sunbeam18.95@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1580-5413>

Anatoly V. Skripal, skripalav@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>

Abstract. Background and Objectives: Measurements of nanodisplacements are relevant for various applications of self-mixing laser (autodyne), in particular when they are combined with microwave probe methods, which are sensitive not only to the profile, but also to the inhomogeneities of the material and the its internal structure. A laser autodyne method for measuring the nanodisplacement by triangular frequency modulation of



the laser radiation is proposed. **Materials and Methods:** A computer simulation of the autodyne signal spectrum is carried out for the case of a change in the supply current of a laser diode according to the triangular law. The autodyne signal spectrum was measured using an RLD-650(5) laser diode on quantum-dimensional structures with a diffraction-limited single spatial mode. **Results:** The distances from the active medium of the laser autodyne to the reflecting surface are found, under which the conditions of equality of an integer number of half-waves to the length of the external resonator at both the lower and upper limits of the deviation range of the laser diode wavelength are satisfied. At these distances (equal-phase distances), the linear dependence of the amplitudes of the spectral components on the magnitude of the nanodisplacements of the surface is observed. This dependence was obtained by measuring the nanodisplacements of the Ratis XY piezo positioner, which is part of the NanoScan Technologies EG-3060 nano-piezostation. **Conclusion:** The possibility of using an autodyne laser with frequency modulation of the radiation to control the nanodisplacements is shown. When the laser diode has a wavelength of 650 nm and the accuracy of measuring the amplitudes of the spectral components is 10%, the accuracy of measuring nanodisplacements can reach 10 nm.

Keywords: self-mixing laser, laser interferometry, semiconductor laser, frequency modulation, nanoprophilometry, spectral analysis, measurement of nanodisplacements

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 19-79-00122).

For citation: Dobdin S. Yu., Dzhaifarov A. V., Shchedrin M. P., Inkin M. G., Skripal An. V. Nanodisplacement measurements by frequency-modulated laser autodyne. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2021, vol. 21, iss. 2, pp. 157–164 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-2-157-164>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Введение

Измерения величин наносмещений и высот неровностей поверхности в нанодиапазоне актуально для различных областей применения лазерных автодинов: измерение напряжений в кремниевых транзисторах последнего поколения [1], фазовая интерферометрическая визуализация частиц и изменений их размеров в наноразмерном масштабе [2], наноразмерная топография и измерение изменяющейся во времени фазовой задержки жидкокристаллических ячеек [3], контроль процессов изготовления полупроводников в реальном времени с нанометровым разрешением [4].

В настоящее время актуально развитие зондовых лазерных профилометров [5–8] с точки зрения возможности их совмещения с СВЧ зондовыми методами, которые оказываются чувствительными не только к высотным размерам профиля поверхности, но и неоднородностям материала и его внутренней структуры. В работах [9, 10] показано, что такое совмещение может быть реализовано частотной модуляцией сигнала лазерного диода по гармоническому закону. В частности, измерения смещения проводились по отношению амплитуд спектральных составляющих автодинного сигнала. Экспериментально получены результаты измерений наноперемещений с разрешением в 80 нм. При этом использование гармонической частотной модуляции сигнала лазерного диода приводило к нелинейной зависимости амплитуд спектральных составляющих от величины наносмещения. Для решения обратной задачи по определению величины наносмещения при таком режиме модуляции требуется решение уравнений, содержащих функции Бесселя.

Более перспективным является метод частотной модуляции сигнала лазерного автодина по треугольному закону, в спектре которого частота интерференционного сигнала [11] пропорциональна расстоянию до отражающей поверхности. Существуют разнообразные методики комбинированного изменения частоты излучения лазерного автодина, которые позволяют при величине девиации длины волны лазерного автодина в несколько нанометров достичь 10 мкм точности измерений [12–14].

В работе рассматривается возможность достижения нанометровой точности измерения наносмещений отражающей поверхности по прямым измерениям амплитуд спектральных составляющих интерференционных осцилляций частотно-модулированного лазерного автодина при модуляции тока питания лазерного диода по треугольному закону.

1. Расчет спектра автодинного сигнала

Выражение для автодинного сигнала при модуляции тока питания лазерного диода может быть представлено в виде [15]:

$$P(j(t)) = P_1(j(t)) + P_2 \cos(\omega(j(t))\tau), \quad (1)$$

где $P_1(j(t))$ – составляющая мощности, не зависящая от фазы лазерного излучения; P_2 – амплитуда интерференционных осцилляций автодинного сигнала; τ – время обхода лазерным излучением внешнего резонатора, образованного областью между активной средой лазерного автодина и отражающей поверхностью; $\omega(j(t))$ – мгновенная циклическая частота излучения полупроводникового лазера, зависящая от плотности тока накачки $j(t)$.



В автодинном сигнале можно выделить следующую нормированную величину, зависящую только от фазы автодинного сигнала:

$$p = \cos(\theta), \quad (2)$$

где $\theta = \omega(j(t))\tau$ – фаза автодинного сигнала.

При модуляции тока питания лазера $j(t)$ во внешнем резонаторе автодина могут выполняться условия равенства целого количества полуволн длине внешнего резонатора лазерного диода, совпадающей с расстоянием от активной среды лазерного автодина до отражающей поверхности. В этом случае локальные экстремумы мощности автодинного сигнала (2) будут наблюдаться при условии

$$p = \cos(\omega\tau) = \pm 1, \quad (3)$$

где

$$\omega\tau = \frac{2\pi c}{\lambda} \tau = \pi n \quad \text{при } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

Условия равенства целого количества полуволн лазерного излучения длине внешнего резонатора на длине волны $\lambda + \Delta\lambda$ будут наблюдаться при условии:

$$\frac{2\pi c}{\lambda + \Delta\lambda} \tau = \pi(n - 1) \quad \text{при } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Для расстояний $2L = c\tau$, соответствующих условиям равенства (4) и (5), будут выполняться соотношения

$$L = n\lambda / 4 \quad \text{и} \quad L = (n - 1)(\lambda + \Delta\lambda) / 4. \quad (6)$$

Выполнение условий (6) позволяет получить выражение для расстояния до отражателя, при котором будет наблюдаться равенство фаз (4) и (5):

$$L = \frac{\lambda^2}{4\Delta\lambda} \cdot n. \quad (7)$$

Заданное соотношением (7) расстояние до объекта мы назвали равнофазным [14]. Как было показано ранее [14], на равнофазных расстояниях точность измерения абсолютных расстояний имеет максимальную величину.

Расчет автодинного сигнала и его спектра проводился при треугольной форме изменения $P_1(j(t))$ – составляющей мощности лазерного автодина и $\omega(j(t))$ – частоты излучения полупроводникового лазера, а также следующих параметрах: длина волны лазерного излучения $\lambda = 650$ нм, девиация частоты излучения полупроводникового лазерного диода $\Delta\lambda = 0.07$ нм.

При $n = 32$ соотношение (7) дает для равнофазного расстояния следующую величину: $L = 48.3$ мм. При частоте модуляции лазера $f = 170$ Гц на рис. 1 приведены спектры автодин-

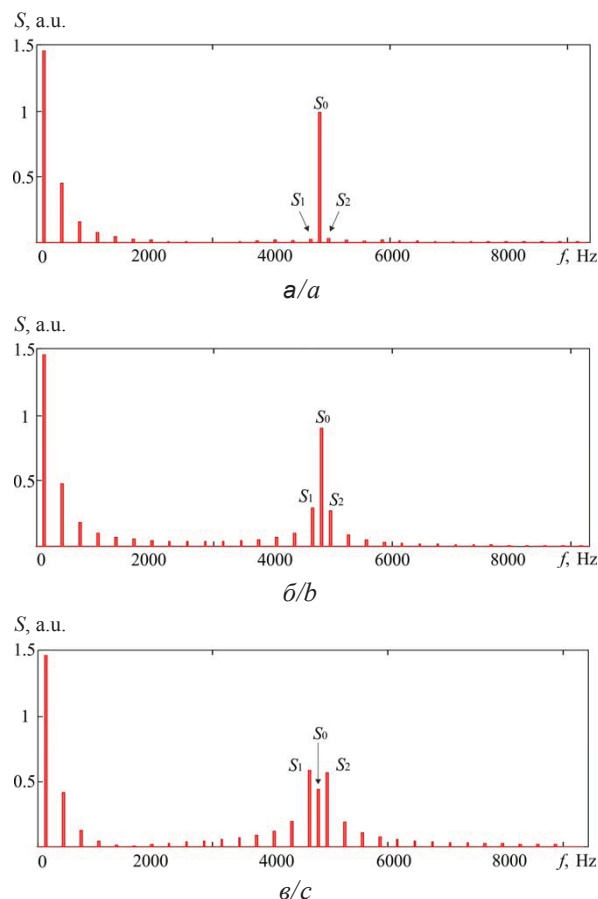


Рис. 1. Спектры автодинного сигнала на равнофазном расстоянии при различных фазах $\delta\theta$: а – $\delta\theta = 0$, б – $\delta\theta = 0.2\pi$, в – $\delta\theta = 0.4\pi$

Fig. 1. Autodyne signal spectra at the equal-phase distance at different phases $\delta\theta$: а – $\delta\theta = 0$, б – $\delta\theta = 0.2\pi$, в – $\delta\theta = 0.4\pi$

ного сигнала на равнофазном расстоянии (7) при различных фазах $\delta\theta$, где $\delta\theta$ – фаза из основного интервала изменения фаз автодинного сигнала θ :

$$\theta = 2\pi m + \delta\theta, \quad \text{при } m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

При фазе $\delta\theta = 0$ в спектре автодинного сигнала (рис. 1, а) наблюдается интерференционная спектральная составляющая S_0 , частота которой соответствует частоте изменения интерференционных осцилляций автодинного сигнала. При фазах $\delta\theta = 0.2\pi$ и $\delta\theta = 0.4\pi$ в спектре (рис. 1, б, в) появляются сателлиты интерференционной составляющей спектра автодинного сигнала, что обусловлено свойствами фурье-спектра при изменении начальной фазы автодинного сигнала.

На рис. 2 приведены спектры автодинного сигнала на расстояниях, отличных от равнофазного на 0.75 мм, соответствующих половине величины между равнофазными расстояниями [14].

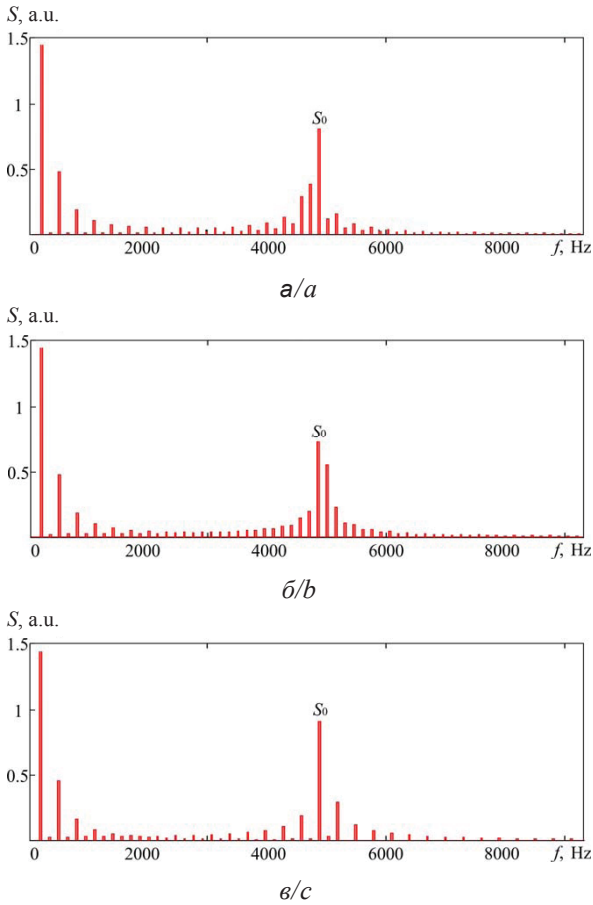


Рис. 2. Спектры автодинного сигнала на расстояниях, отличных от равнофазного на 0.75 мм, при различных фазах $\delta\theta$: $a - \delta\theta = 0$, $b - \delta\theta = 0.2\pi$, $c - \delta\theta = 0.4\pi$
 Fig. 2. Autodyne signal spectra at distances which differ from the equal-phase by 0.75 mm at different phases $\delta\theta$: $a - \delta\theta = 0$, $b - \delta\theta = 0.2\pi$, $c - \delta\theta = 0.4\pi$

Видно, что при всех фазах $\delta\theta = 0$, $\delta\theta = 0.2\pi$ и $\delta\theta = 0.4\pi$ в спектре наблюдаются спутники интерференционной составляющей спектра автодинного сигнала.

Зависимость амплитуд спектральных составляющих S_0, S_1, S_2 от фазы автодинного сигнала $\delta\theta$ представлена на рис. 3. Видно, что наблюдается нелинейная зависимость этих амплитуд от фазы автодинного сигнала.

На рис. 4 приведена зависимость разности спектральных составляющих $S_0 - (S_1 + S_2) / 2$ от фазы $\delta\theta$.

Как следует из рис. 4, разность амплитуд спектральных составляющих $S_0 - (S_1 + S_2) / 2$ линейно зависит от фазы автодинного сигнала и, следовательно, от расстояния до отражающей поверхности. Компьютерное моделирование показало, что, задавая погрешность измерения ам-

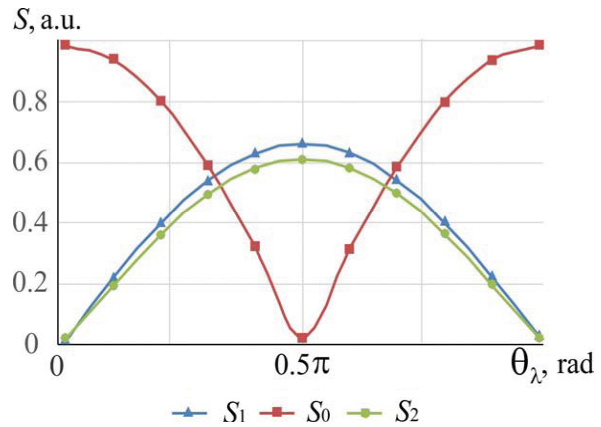


Рис. 3. Зависимость амплитуд спектральных составляющих S_0, S_1, S_2 от фазы $\delta\theta$
 Fig. 3. Dependence of the amplitudes of spectral components S_0, S_1, S_2 on the phase $\delta\theta$

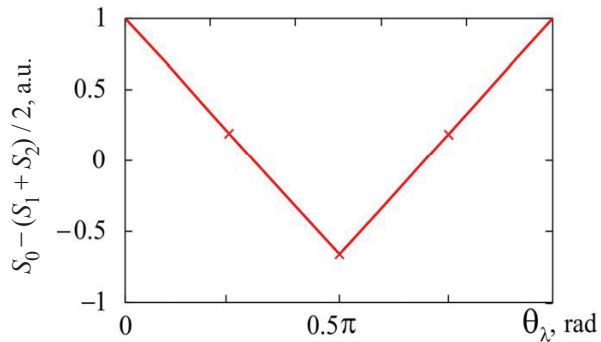


Рис. 4. Зависимость разности спектральных составляющих $S_0 - (S_1 + S_2) / 2$ от фазы $\delta\theta$
 Fig. 4. Dependence of the difference of spectral components $S_0 - (S_1 + S_2) / 2$ on the phase $\delta\theta$

плитуд спектральных составляющих равную 10%, получаем точность измерения наносмещений в этом случае не хуже 10 нм.

Можно отметить, что существуют методы обработки спектра автодинного сигнала, обеспечивающие 1% точность измерения амплитуд спектральных составляющих. Теоретическая точность измерения наносмещений поверхности в этом случае может достигнуть величины 1 нм.

2. Лазерная автодинная система для измерения наносмещений

На рис. 5 приведена блок-схема экспериментальной установки, в состав которой входил полупроводниковый лазерный модуль RLD-650 на квантоворазмерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой и длиной волны 650 нм I , напряжение на



который подавалось через источник напряжения, стабилизированный по току 2. Излучение лазерного модуля направлялось на поверхность отражателя 3, наносмещение которого осуществлялось нанопьезостанцией NanoScan Technologies EG-3060 (ООО «Нано Скан Технологии», РФ) 4. Калибровка наносмещений проводилась с использованием пьезопозиционера Ratis XY, входящего в состав нанопьезостанции NanoScan Technologies EG-3060 5. Небольшая часть излучения, отраженная от диффузной поверхности

отражателя, возвращалась в резонатор полупроводникового лазера, изменение выходной мощности которого регистрировалось встроенным в лазерный модуль фотодетектором. Остальная часть излучения рассеивалась. Сигнал с фотодетектора через усилитель и аналого-цифровой преобразователь (АЦП), встроенные в лабораторную станцию виртуальных приборов NI ELVIS (National Instruments, USA) 6, поступал в компьютерную станцию 7, в которой выполнялась последующая обработка сигнала.

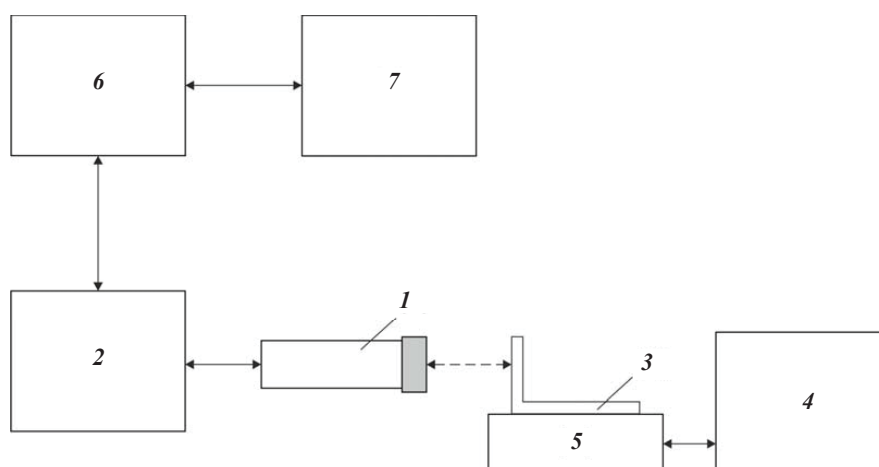


Рис. 5. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – полупроводниковый лазерный модуль RLD-650, 2 – источник напряжения, стабилизированный по току, 3 – диффузный отражатель, 4 – нанопьезостанция NanoScan Technologies EG-3060, 5 – пьезопозиционер Ratis XY, 6 – лабораторная станция виртуальных приборов NI ELVIS, 7 – компьютерная станция
Fig. 5. General view of the experimental setup: 1 – RLD-650 semiconductor laser module, 2 – stabilized current source, 3 – diffuse reflector, 4 – NanoScan Technologies EG-3060 nanopiezostation, 5 – Ratis XY piezo positioner, 6 – NI ELVIS virtual instrument laboratory station, 7 – computer

Частотная модуляция сигнала лазерного диода проводилась на частоте $f = 170$ Гц посредством изменения тока питания лазера по треугольному закону. Излучение лазерного модуля фокусировалось линзой с числовой апертурой $NA = 0.25$ и фокусным расстоянием 10 мм. Отражатель располагался вблизи плоскости фокусировки лазерного пучка.

Как известно, максимальный коэффициент автодиного усиления лежит вблизи пороговых значений тока питания полупроводникового лазера. В связи с этим ток питания лазерного автодина задавался на уровне 1.2 от значения порогового тока ($I_{th} = 25$ мА), при этом мощность излучения лазерного диода уменьшалась до 2 мВт при рабочей мощности 5 мВт.

Для уменьшения уровня обратной связи использовалась регулируемая расфокусировка

пучка лазера [15]. Используя наборы различных спектральных составляющих автодиного сигнала, определяли уровень обратной связи, который во время измерений не превышал значений 0.15. Калибровка девиации длины волны лазерного модуля осуществлялась на эшелле-спектрометре высокого разрешения SHR (Solar Laser Systems, Республика Беларусь).

На рис. 6 представлены измеренные спектры $S(f)$ при девиации длины волны лазерного излучения $\Delta\lambda = 0.07$ нм, полученные на расстоянии от активной среды лазерного автодина до отражающей поверхности равном ~ 48 мм. Изменением по треугольному закону напряжения, подаваемом на стабилизатор тока питания лазерного модуля, изменяли величину девиации длины волны лазерного излучения до появления картины спектра автодиного сигнала, соответствующей виду



спектров, приведенных на рис. 1. На рис. 6, а расстояние от активной среды лазерного автодина до отражающей поверхности соответствует

равнофазному расстоянию, а на рис. 6, б приведен спектр автодинного сигнала на расстоянии, увеличенном относительно равнофазного на 0.75 мм.

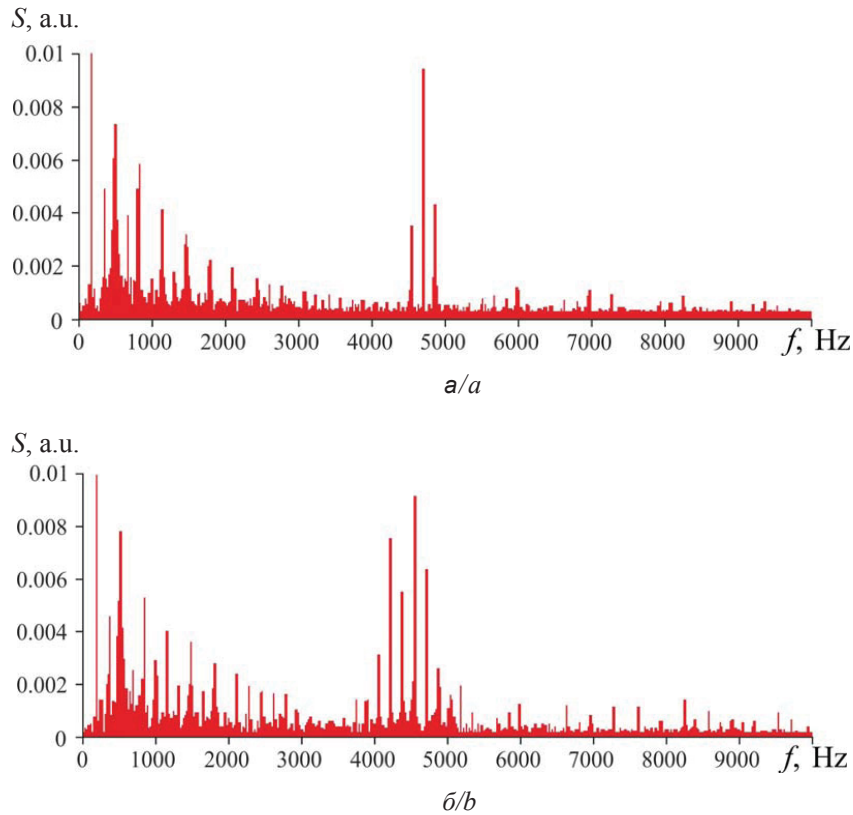


Рис. 6. Спектры $S(f)$ при девиации длины волны лазерного излучения $\Delta\lambda = 0.07$ нм: а – поверхность находится на равнофазном расстоянии от активной среды лазерного автодина до отражающей поверхности равном ~ 48 мм, б – расстояние до отражающей поверхности увеличено относительно равнофазного на 0.75 мм
Fig. 6. Spectra $S(f)$ at the deviation of the laser radiation wavelength $\Delta\lambda = 0.07$ nm: а – the surface is located at an equal-phase distance from the active medium of the laser autodyne to the reflecting surface of ~ 48 mm, б – the distance increases relative to the equal-phase by 0.75 mm

На рис. 7 приведены результаты измерений наносмещений ΔL при величине шага смещения столика нанопьезостанции NanoScan Technologies EG-3060 равного 10 нм. При этом учитывалась периодичность изменения автодинного сигнала. Как видно из рис. 7, наблюдается линейная зависимость измеренной разности спектральных составляющих $S_0 - (S_1 + S_2)/2$ от величины наносмещения пьезопозиционера, соответствующая результатам теоретического анализа. Разброс измеренных амплитуд спектральных составляющих при каждом положении отражателя относительно падающего лазерного излучения составил менее 10%. По максимальной величине этого разброса определялось отклонение от среднего значения. Разброс по оси абсцисс при этом составил менее 10 нм.

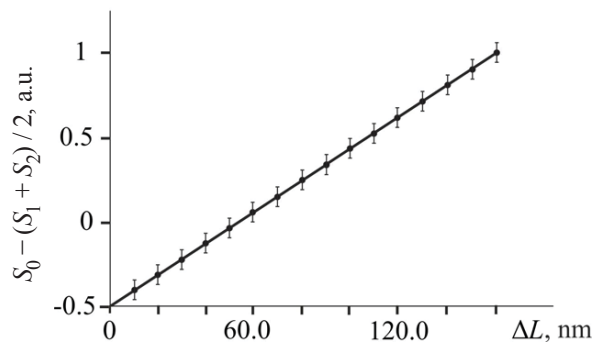


Рис. 7. Зависимость измеренной разности спектральных составляющих $S_0 - (S_1 + S_2)/2$ от величины наносмещения пьезопозиционера ΔL
Fig. 7. Dependence of the measured difference of spectral components $S_0 - (S_1 + S_2)/2$ on the nanodisplacement of the piezoelectric positioner ΔL



Заключение

Показана возможность применения полупроводникового лазерного автодина с частотной модуляцией сигнала по треугольному закону для измерения наносмещений. Проведен анализ формирования спектра автодинного сигнала на расстояниях (равнофазных) от активной среды лазерного автодина до отражающей поверхности, на которых выполняется условие равенства целого количества полуволн длине внешнего резонатора на границах диапазона девиации длины волны лазерного диода. Показано, что поведение спектра при изменении фазы автодинного сигнала существенно зависит от расстояния до отражающей поверхности. Проведен сравнительный анализ спектров автодинного сигнала на расстояниях, равных и отличных от равнофазного. При этом на равнофазных расстояниях наблюдается линейная зависимость разности спектральных составляющих от величины наносмещения.

Измерения наносмещений проводились с использованием лазерного модуля на квантоворазмерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой, работающего в автодинном режиме. Калибровка наносмещений проводилась с использованием пьезопозиционера Ratis XY, входящего в состав нанопьезостанции NanoScan Technologies EG-3060. Измерение девиации длины волны лазерного модуля осуществлялось на эшелле-спектрометре высокого разрешения SHR. Равнофазное расстояние обеспечивалось путем изменения величины девиации длины волны лазерного излучения.

Экспериментально получена линейная зависимость измеренной разности спектральных составляющих автодинного сигнала от величины наносмещения пьезопозиционера, соответствующая результатам теоретического анализа при смещении отражающей поверхности с шагом 10 нм. При измерениях амплитуд спектральных составляющих с точностью лучше, чем 10% погрешность измерения наносмещения поверхности была не хуже 10 нм.

Как было отмечено, компьютерное моделирование и проведенные измерения выполнены в области равнофазных расстояний. На практике при юстировке лазерного автодина может понадобиться операция поиска равнофазного расстояния, которая может быть реализована изменением девиации длины волны лазерного автодина.

Список литературы

1. Hÿtch M., Houdellier F., Hÿe F., Snoeck E. Nanoscale holographic interferometry for strain measurements in electronic devices // *Nature*. 2008. Vol. 453, iss. 7198. P. 1086–1089. DOI: 10.1038/nature07049
2. Wu Y., Li H., Brunel M., Chen J., Gréhan G., Mädler L. Phase interferometric particle imaging for simultaneous measurements of evaporating micron-sized droplet and nanoscale size changes // *Appl. Phys. Lett.* 2017. Vol. 111, iss. 4. P. 041905. DOI: 10.1063/1.4996363
3. Rajshekhar G., Bhaduri B., Edwards C., Zhou R., Goddard L., Popescu G. Nanoscale topography and spatial light modulator characterization using wide-field quantitative phase imaging // *Optics Express*. 2014. Vol. 22, iss. 3. P. 3432–3438. DOI: 10.1364/OE.22.003432
4. Edwards C., Arbabi A., Popescu G., Goddard L. Optically monitoring and controlling nanoscale topography during semiconductor etching // *Light Sci. Appl.* 2012. Vol. 1, iss. 9. P. e30. DOI: 10.1038/lsa.2012.30
5. Wang S., Tian Y., Tay C.J., Quan C. Development of a laser-scattering-based probe for on-line measurement of surface roughness // *Applied Optics*. 2003. Vol. 42, iss. 7. P. 1318–1324.
6. Hovhannisyan D. L., Vardanyan A. O., Melikyan S. R., Savkin K. B., Tikhomirov S. V., Hovhannisyan G. D. Correlational Nonlinear Optical Femtosecond Laser Profilometer with Micrometer Spatial Resolution // *Meas. Tech.* 2017. Vol. 60, iss. 8. P. 794–800.
7. Hayasaki Y., Pham Q. D. Fused phase image obtained from frequency comb profilometer and optical interferometer // *Frontiers in Optics*. 2017. P. FW2C.2. DOI: 10.1364/FIO.2017.FW2C.2
8. Donati S., Norgia M. Overview of self-mixing interferometer applications to mechanical engineering // *Optical Engineering*. 2018. Vol. 57, iss. 5. 051506. DOI: 10.1117/1.OE.57.5.051506
9. Усанов Д. А., Скрипаль Ан. В., Астахов Е. И., Добдин С. Ю. Регистрация наноперемещений зонда ближнеполюсового СВЧ микроскопа с помощью полупроводникового лазерного автодина // *Нано- и микро-системная техника*. 2018. Т. 20, № 1. С. 3–10.
10. Usanov D. A., Skripal An. V., Astakhov E., Dobdin S. Yu. Self-mixing laser diode included in scanning microwave microscope to the control of probe nanodisplacement // *Proc. SPIE. Laser Physics and Photonics XVIII; and Computational Biophysics and Analysis of Biomedical Data IV. International Society for Optics and Photonics*. 2018. Vol. 10717. P. 1071708. DOI: 10.1117/12.2315231
11. Amann M. C., Bosch T. M., Lescure M., Myllylae R. A., Rioux M. Laser ranging : A critical review of usual technique for distance measurement // *Optical Engineering*. 2001. Vol. 40, iss. 1. P. 10–19.
12. Norgia M., Magnani A., Pesatori A. High resolution self-mixing laser rangefinder // *Review of Scientific Instruments*. 2012. Vol. 83, iss. 4. P. 045113.
13. Kou K., Li X., Li L., Xiang H. Injected current reshaping in distance measurement by laser self-mixing interferometry // *Applied Optics*. 2014. Vol. 53, iss. 27. P. 6280–6286.



14. Усанов Д. А., Скрипаль Ан. В., Добдин С. Ю., Джафаров А. В., Соколенко И. С. Предельные возможности автодиной интерферометрии расстояния пилообразной модуляции длины волны полупроводникового лазера // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43, № 5. С. 797–803.
15. Усанов Д. А., Скрипаль Ан. В. Полупроводниковые лазерные автодины для измерения параметров движения при микро- и наносмещениях. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. 136 с.
7. Hayasaki Y., Pham Q. D. Fused phase image obtained from frequency comb profilometer and optical interferometer. *Frontiers in Optics*, 2017, pp. FW2C.2. DOI: 10.1364/FIO.2017.FW2C.2.
8. Donati S., Norgia M. Overview of self-mixing interferometer applications to mechanical engineering. *Optical Engineering*, 2018, vol. 57, no. 5, pp. 051506. DOI: 10.1117/1.OE.57.5.051506
9. Usanov D. A., Skripal An. V., Astakhov E. I., Dobdin S. Yu. Recording of the nanoscale displacements of the probe of a near-field microwave microscope by means of a semiconductor laser auto-dyne. *Nano- and Microsystem Engineering*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 3–10 (in Russian).
10. Usanov D. A., Skripal An. V., Astakhov E., Dobdin S. Yu. Self-mixing laser diode included in scanning microwave microscope to the control of probe nanodisplacement. *Proc. SPIE. Laser Physics and Photonics XVIII; and Computational Biophysics and Analysis of Biomedical Data IV. International Society for Optics and Photonics*, 2018, vol. 10717, pp.1071708. DOI: 10.1117/12.2315231
11. Amann M. C., Bosch T. M., Lescure M., Myllylae R. A., Rioux M. Laser ranging: A critical review of usual technique for distance measurement. *Optical Engineering*, 2001, vol. 40, no. 1, pp.10–19.
12. Norgia M., Magnani A., Pesatori A. High resolution self-mixing laser rangefinder. *Review of Scientific Instruments*, 2012, vol. 83, no. 4, pp. 045113.
13. Kou K., Li X., Li L., Xiang H. Injected current reshaping in distance measurement by laser self-mixing interferometry. *Applied Optics*, 2014, vol. 53, no. 27, pp. 6280–6286.
14. Usanov D. A., Skripal An. V., Dobdin S. Yu., Dzhafarov A. V., Sokolenko I. C. Limiting capabilities of self-mixing interferometry upon sawtooth modulation of a semiconductor laser wavelength. *Computer Optics*, 2019, vol. 43, no. 5, pp. 797–803 (in Russian).
15. Usanov D. A., Skripal An. V. *Poluprovodnikovye lazernye avtodiny dlya izmereniya parametrov dvizheniya pri mikro- i nanosmeshcheniyah* [Semiconductor Laser Autodynes for Measurement of Motion Parameters at Micro- and Nanoscale Displacements]. Saratov, Izdatelstvo Saratovskogo universiteta, 2014. 136 p. (in Russian).

References

1. Hütch M., Houdellier F., Hüb F. Nanoscale holographic interferometry for strain measurements in electronic devices. *Nature*, 2008, vol. 453, pp. 1086–1089. DOI: 10.1038/nature07049
2. Wu Y., Li H., Brunel M., Chen J., Gréhan G., Mädler L. Phase interferometric particle imaging for simultaneous measurements of evaporating micron-sized droplet and nanoscale size changes. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, vol. 111, iss. 4, pp. 041905. DOI: 10.1063/1.4996363
3. Rajshekhar G., Bhaduri B., Edwards C., Zhou R., Goddard L., Popescu G. Nanoscale topography and spatial light modulator characterization using wide-field quantitative phase imaging. *Optics Express*, 2014, vol. 22, iss. 3, pp. 3432–3438. DOI: 10.1364/OE.22.003432
4. Edwards C., Arbabi A., Popescu G., Goddard L. Optically monitoring and controlling nanoscale topography during semiconductor etching. *Light Sci. Appl.*, 2012, vol.1, no. 9, pp. e30. DOI: 10.1038/lsa.2012.30
5. Wang S., Tian Y., Tay C.J., Quan C. Development of a laser-scattering-based probe for on-line measurement of surface roughness. *Applied Optics*, 2003, vol. 42, iss. 7, pp. 1318–1324.
6. Hovhannisyan D. L., Vardanyan A. O., Melikyan S. R., Savkin K. B., Tikhomirov S. V., Hovhannisyan G. D. Correlational Nonlinear Optical Femtosecond Laser Profilometer with Micrometer Spatial Resolution. *Meas. Tech.*, 2017, vol. 60, no. 8, pp. 794–800.

Поступила в редакцию 12.01.2021, после рецензирования 18.03.2021, принята к публикации 26.03.2021

Received 12.01.2021, revised 18.03.2021, accepted 26.03.2021