

УДК 535.417

Р.В. Ромашко, И.О. Яшкузин, Т.А. Ефимов, М.А. Асалханова

Геометрия записи динамических голограмм в фоторефрактивном кристалле для детектирования колебаний микроосцилляторов

Проводится анализ эффективности применения адаптивных интерферометров, построенных в различных геометриях записи динамических голограмм в фоторефрактивном кристалле, в задачах детектирования колебаний микромасштабных объектов. Исследуются эффективность взаимодействия, глубина модуляции и порог детектирования измерительных систем.

Ключевые слова: микроосциллятор, адаптивный интерферометр, голограмма.

Задача детектирования колебаний микроосцилляторов. Важной задачей исследования микрообъектов является определение их перемещений [1–2]. В работах [3, 4] показана эффективность использования адаптивного голографического интерферометра для детектирования колебаний микроантилеверов. Голографический принцип объединения волн в фоторефрактивном кристалле (ФРК) позволяет обеспечить точное согласование волновых фронтов опорного и объектного лазерных пучков [5]. Существуют различные схемы построения адаптивных голографических интерферометров, в основе которых лежат разные геометрии записи динамической голограммы в ФРК [6]. Динамические голограммы могут записываться в ФРК в отражательной, пропускающей и ортогональной геометриях. Геометрия формирования динамической голограммы определяет различные метрологические характеристики (рис. 1). В работах [3, 4] использована ортогональная геометрия записи динамических голограмм в ФРК. В настоящей работе проводится анализ эффективности применения адаптивных интерферометров, построенных при применении различных геометрий записи динамических голограмм в ФРК, в задаче детектирования колебаний микромасштабных объектов, исследуются эффективность взаимодействия, глубина модуляции, порог детектирования измерительных систем.

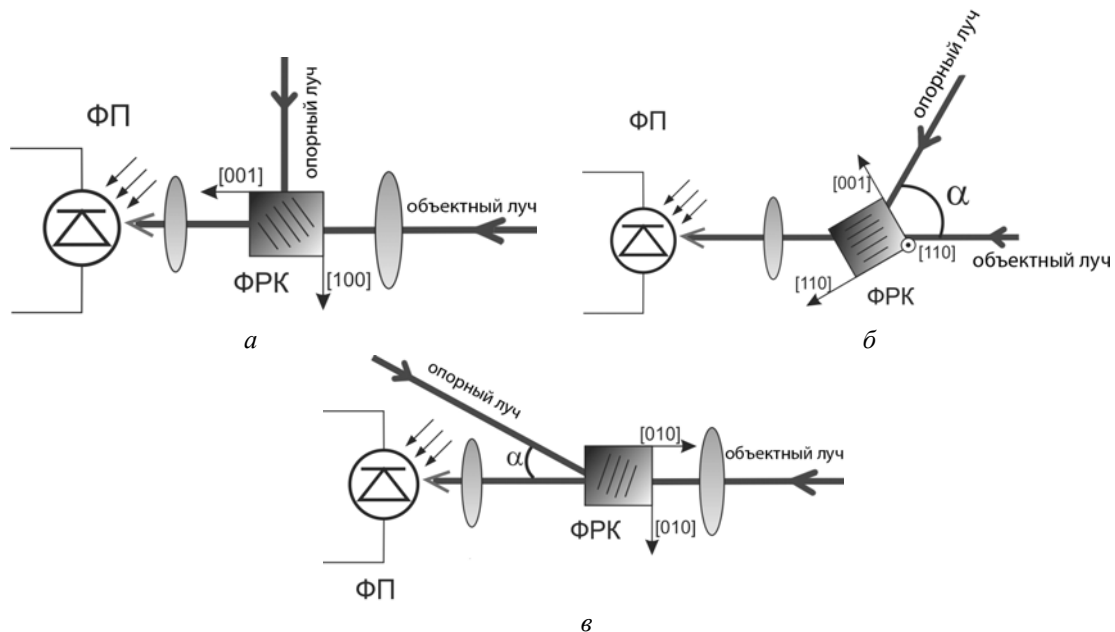


Рис. 1. Геометрии записи динамических голограмм в ФРК: ФП – фотоприемник; α – угол между объектным и опорным лучом: *a* – ортогональная геометрия; *б* – пропускающая геометрия ($\alpha = 50^\circ$); *в* – отражательная ($\alpha = 30^\circ$)

Из анализа геометрий записи динамических голограмм в ФРК в работе [6] следует, что наибольшая глубина модуляции сигнала при детектировании колебаний микрообъектов может быть

достигнута при использовании отражательной геометрии записи. В свою очередь ортогональная геометрия записи позволяет добиться поляризационной независимости, что особенно важно при исследовании колебаний микроосцилляторов предельно малых размеров. Для экспериментального исследования особенностей взаимодействия световых пучков в кристалле в различных геометриях было изготовлено три модификации адаптивного голографического интерферометра. В качестве источника излучения использовался Nd:YAG-лазер, работающий в непрерывном режиме на длине волны 1064 нм, мощностью 25 мВт. Лазерный пучок делился на объектный и опорный пучки. Объектный пучок фокусировался линзой и направлялся на микроосциллятор, закрепленный на калиброванном электродинамическом преобразователе, с помощью которого осуществлялась передача колебаний исследуемому микроосциллятору. Вследствие колебаний микроосциллятора отраженное от него излучение было модулировано по фазе. Отраженное излучение собиралось линзой и фокусировалось в ФРК CdTe. Опорный пучок проходил через четвертьволновую фазовую пластинку и направлялся в ФРК. Демодуляция фазы волны, отраженной от микроосциллятора, осуществлялась посредством ее взаимодействия с опорной волной, входящей в кристалл по нормали к объектной волне. Интенсивность объектного пучка на выходе из ФРК регистрировалась с помощью фотоприемника. Опорный луч не фокусировался для обеспечения одинаковой интенсивности излучения в кристалле в разных геометриях. Особенность работы адаптивного интерферометра в различных геометриях была также проверена для плоского зеркала, которое устанавливалось вместо микроосциллятора.

Экспериментальные результаты. В качестве микроосциллятора использовался кремниевый микроантилевер с размерами $180 \times 45 \times 15$ мкм³. Для ортогональной и пропускающей геометрий записи показаны экспериментально полученные зависимости амплитуды модуляции регистрируемого сигнала от амплитуды напряжения на электродинамическом преобразователе для разных соотношений мощности объектного и опорного пучков (рис. 2).

Чувствительность адаптивного интерферометра в ортогональной геометрии (рис. 2, а) слабо зависит от отношения мощности объектного пучка к мощности опорного. Наибольшая глубина модуляции регистрируемого сигнала составила 10,4% при соотношении мощностей объектного и опорного пучков 1,4/1000. При этом относительный порог детектирования (ОПД) [7] адаптивного интерферометра составил $5,2 \times 10^{-8}$ рад $\sqrt{(\text{Вт}/\text{Гц})}$. Для плоского зеркала, используемого в качестве исследуемого объекта, чувствительность в ортогональной геометрии составила $2,4 \times 10^{-8}$ рад $\sqrt{(\text{Вт}/\text{Гц})}$.

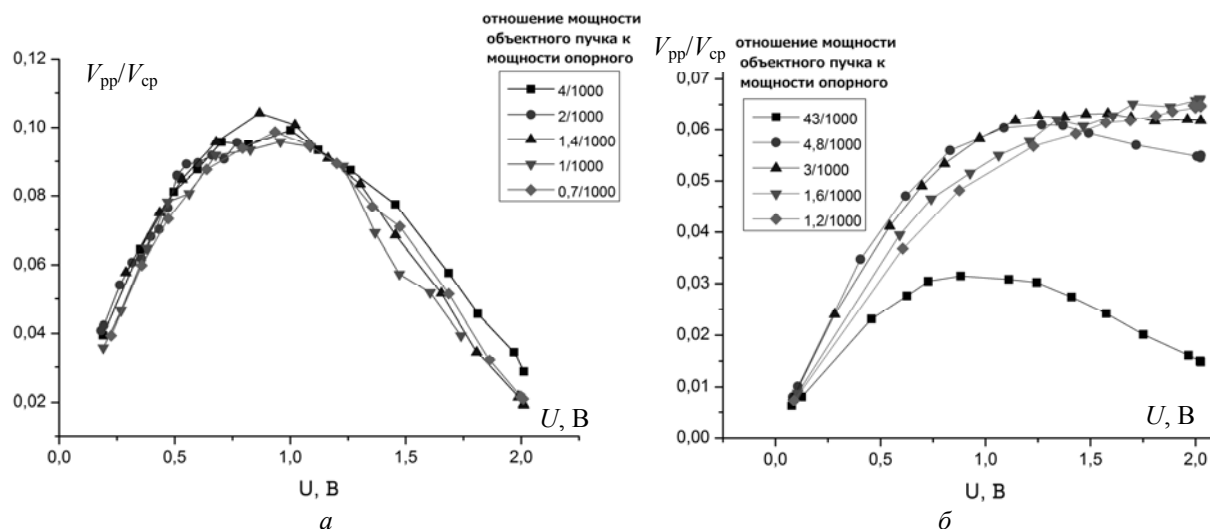


Рис. 2. Зависимости амплитуды модуляции регистрируемого сигнала (V_{pp}/V_{cp}) от амплитуды напряжения на электродинамическом преобразователе (U , В): а – ортогональная геометрия; б – пропускающая геометрия

Максимальная чувствительность адаптивного интерферометра в пропускающей геометрии (рис. 2, б) достигается при отношении мощности объектного пучка к мощности опорного 4,8/1000. Наибольшая глубина модуляции регистрируемого сигнала составила 6,6% при соотношении мощностей объектного и опорного пучков 1,6/1000. При этом ОПД адаптивного интерферометра составил $2,9 \times 10^{-8}$ рад $\sqrt{(\text{Вт}/\text{Гц})}$. Для плоского зеркала, используемого в качестве исследуемого объекта, чувствительность в данной геометрии составила $1,5 \times 10^{-8}$ рад $\sqrt{(\text{Вт}/\text{Гц})}$.

В отражательной геометрии часть излучения опорного луча попадала в фотоприемник из-за отражения и рассеяния излучения опорного луча на гранях ФРК. Вследствие этого амплитуда регистрируемого сигнала модуляции была сравнимой с собственными шумами адаптивного интерферометра. Для решения этой проблемы, во-первых, была уменьшена мощность опорного пучка при сохранении интенсивности в ФРК за счет использования дополнительной фокусирующей линзы, во-вторых, были добавлены пространственные фильтры. После указанных изменений отношение переменной составляющей регистрируемого сигнала к постоянной составляющей было не более 0,7%. При этом ОПД адаптивного интерферометра составил 35×10^{-8} рад $\sqrt{(\text{Вт}/\text{Гц})}$. При использовании плоского зеркала чувствительность в данной геометрии составила $1,3 \times 10^{-8}$ рад $\sqrt{(\text{Вт}/\text{Гц})}$.

Экспериментальные данные для ортогональной, пропускающей и отражательной геометрий записи динамических голограмм в ФРК представлены в таблице. Анализ представленных экспериментальных данных, полученных с использованием ортогональной, пропускающей и отражательной геометрий записи динамических голограмм в ФРК, позволяет сделать вывод, что наиболее эффективная демодуляция фазы волны, при которой достигаются наибольшая чувствительность и глубина модуляции регистрируемого сигнала при детектировании колебаний микроосциллятора, обеспечивается при использовании ортогональной геометрии записи динамических голограмм в ФРК. В случае детектирования колебаний плоского зеркала наиболее эффективная работа адаптивного интерферометра достигается в отражательной геометрии, что находится в соответствии с теоретическим и экспериментальным анализом, представленным в работе [6].

Экспериментальные данные для разных геометрий записи динамических голограмм в ФРК

Параметр	Ортогональная геометрия	Пропускающая геометрия	Отражательная геометрия
Максимальная глубина модуляции (микроосциллятор), %	10,4	6,6	0,7
Оптимальное соотношение мощностей пучков (объектного к опорному)	1,4/1000	1,6/1000	—
Порог детектирования (микроосциллятор), рад $\sqrt{(\text{Вт}/\text{Гц})}$	$2,4 \times 10^{-8}$	$2,9 \times 10^{-8}$	35×10^{-8}
Порог детектирования (плоское зеркало), рад $\sqrt{(\text{Вт}/\text{Гц})}$	$5,2 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-8}$	$1,3 \times 10^{-8}$

Заключение. Таким образом, наиболее эффективная работа адаптивного голографического интерферометра в задаче детектирования колебаний микроосцилляторов, при которой наблюдается наибольшая чувствительность и глубина модуляции регистрируемого сигнала, достигается при использовании ортогональной геометрии записи динамических голограмм в ФРК.

Исследование выполнено при поддержке Программы «Научный фонд» ДВФУ», а также Президиума ДВО РАН.

Литература

1. Study of intrinsic localized vibrational modes in micromechanical oscillator arrays / M. Sato, B.E. Hubbard, L.Q. English, and A.J. Sievers // *Chaos*. – 2003. – Vol. 1382. – P. 702–715.
2. Sekaric L. et al. Nanomechanical resonant structures as tunable passive modulators of light // *Applied physics letters*. – 2002. – Vol. 80, № 19. – P. 3617–3619.
3. Romashko R.V. et al. Detection of micro-objects nano-scale vibration by adaptive interferometer // *Pacific Science Review*. – 2012. – Vol. 14, № 3. – P. 233–234.
4. Romashko R.V. et al. Resonance Microweighting Approach with Using Adaptive Interferometer // *Pacific Science Review* – 2012. – Vol. 14, № 3. – P. 334–336.
5. Fast adaptive interferometer on dynamic reflection hologram in CdTe: V / S.Di Girolamo, A.A. Kamshilin, R.V. Romashko et al. // *Optics express*. – 2007. – Vol. 15, № 2. – P. 545–555.
6. Photorefractive vectorial wave mixing in different geometries / R.V. Romashko et al. // *JOSA B*. – 2010. – Vol. 27, № 2. – P. 311–317.
7. Orthogonal geometry of wave interaction in a photorefractive crystal for linear phase demodulation / S.Di Girolamo et al. // *Optics Communications*. – 2010. – Vol. 283, № 1. – P. 128–131.

Ромашко Роман Владимирович

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. теоретической и экспериментальной физики (ТЭФ)
Дальневосточного федерального университета (ДФУ);
вед. науч. сотрудник лаборатории прецизионных оптических методов измерений
Института автоматизации и процессов управления
Дальневосточного отделения РАН (ИАПУ ДВО РАН), г. Владивосток
Тел.: 8 (423-2) 231-04-39
Эл. почта: romashko@iacp.dvo.ru

Яшкузин Игорь Олегович

Студент каф. ТЭФ ДВФУ
Тел.: 8 (924) 250-67-87
Эл. почта: alex_202@mail.ru

Ефимов Тимофей Александрович

Аспирант ИАПУ ДВО РАН
Тел.: 8 (423-2) 231-04-39
Эл. почта: tim2vl@yandex.ru

Асалханова Мария Алексеевна

Аспирант ИАПУ ДВО РАН
Тел.: 8 (914) 328-06-94
Эл. почта: facir@mail.ru

Romashko R.V., Yashkuzin I.O., Efimov T.A., Asalkhanova M.A.

The geometry of the recording of dynamic holograms in a photorefractive crystal to detect the vibration of microoscillators

The holographic system for measurement of nanoscale displacements of micro- and macro-objects based on an adaptive interferometer is developed in different geometries. Effectiveness of the interaction, the depth of modulation and detection threshold of measuring system was studied.

Keywords: microoscillator, an adaptive interferometer, hologram.