

УДК 535.3:535.417

А.А. Колегов, С.М. Шандаров, Ю.Ф. Каргин

Амплитудная характеристика адаптивного голографического интерферометра

Представлены результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований зависимости амплитуды выходного сигнала от амплитуды колебаний зеркально отражающего объекта для адаптивного голографического интерферометра, основанного на встречном взаимодействии в кубическом фоторефрактивном кристалле среза (100).

Ключевые слова: голографический интерферометр, отражательная динамическая голограмма, двухволновое взаимодействие, фазовая модуляция

Введение

Двухволновое взаимодействие световых волн в фоторефрактивных кристаллах является основой для реализации различных устройств оптической обработки информации [1]. Динамический характер фоторефрактивных голограмм, формирующихся при взаимодействии световых пучков, позволяет осуществить адаптивную обработку нестационарных картин светового поля в оптических датчиках [2]. Встречное двухволновое взаимодействие в кристаллах класса силленитов ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$), при котором за счет диффузионного механизма формируются эффективные отражательные голограммы в отсутствие приложенных к ним внешних электрических полей [3], является привлекательным для таких приложений [4].

В настоящей статье представлены результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований амплитудной характеристики адаптивного голографического интерферометра, основанного на встречном взаимодействии световых волн в кристаллах силленитов среза (100), предназначенного для мониторинга колебаний зеркально отражающих объектов.

Принцип голографической интерферометрии

При взаимодействии лазерных пучков (I_S и I_P на рис. 1) в фоторефрактивном кристалле формируется динамическая голограмма, на которой одновременно происходит их самодифракция [1]. На выходе из кристалла происходит интерференция каждого из прошедших кристалл пучков с одним из дифрагировавших пучков, т.е. опорный пучок I_{P0} интерферирует с I_{S1} , а I_{S0} – с I_{P1} . Интенсивность прошедшего через кристалл сигнального пучка можно представить в виде

$$I = I_0(1 + m \cos \Delta\varphi), \quad (1)$$

где $m = 2\sqrt{I_{S0}I_{P1}}/I_0$ и I_0 – суммарная интенсивность пучков I_{S0} и I_{P1} .

Если входной сигнальный пучок I_S получен отражением от объекта, колеблющегося с частотой Ω , то он имеет фазовую модуляцию,

$$\Delta\varphi = \varphi_0 + \varphi_m \cos \Omega t, \quad (2)$$

и его выходная интенсивность после взаимодействия на голограмме со стационарным опорным пучком будет амплитудно-модулированной на частотах $n\Omega$, кратных частоте модуляции, со спектральным распределением глубины модуляции $M^{(n)}(\varphi_0)$, зависящим от значения φ_0 . Предпочтительным для приложений является линейный режим фазовой демодуляции, реализующийся при $\varphi_0 = \pi/2$ и наблюдаемый на основной частоте Ω [4]. В этом случае, при малых амплитудах фазовой модуляции, $m \sim \varphi_m$.

В работе [5] проведен анализ встречного двухволнового взаимодействия циркулярно-поляризованной стационарной опорной волны с фазово-модулированной сигнальной волной, имеющей линейную поляризацию, в кристаллах силленитов среза (100) и получены следующие выражения для её интенсивности на выходе из кристалла и глубины модуляции интенсивности на первой гармонике сигнала:

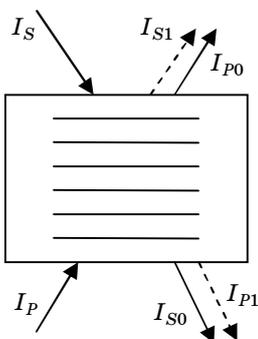


Рис. 1. Принцип работы голографического интерферометра

$$I_S(-d, t) = \left[M^{(0)}(-d) + M^{(1)}(-d)\sin\Omega t + M^{(2)}(-d)\cos 2\Omega t + \dots \right] \left(1 - R^2 \right)^2 \tilde{I}_0 \exp(-\alpha d), \quad (3)$$

$$M^{(1)}(-d, \varphi_m) = J_0(\varphi_m) J_1(\varphi_m) \frac{\Gamma_I}{\rho} \sin(\rho d) \cos(\rho d - 2\theta_{S0}), \quad (4)$$

где R – френелевский коэффициент отражения; \tilde{I}_{S0} и θ_{S0} – интенсивность и угол между кристаллографическим направлением [010] и вектором поляризации соответственно для сигнального пучка в кристалле на его входной грани; d – толщина и ρ – удельное оптическое вращение кристалла; α – коэффициент поглощения света; Γ_I – коэффициент усиления, характеризующий эффективность взаимодействия пучков; J_n – функция Бесселя n -го порядка. Линейный режим фазовой демодуляции в рассматриваемом голографическом интерферометре осуществляется при входном поляризационном угле $\theta_{S0} = \rho d / 2 - p\pi / 2$, где p – целое число.

Результаты экспериментального исследования и теоретического анализа

На рис. 2 представлена схема исследуемого голографического интерферометра. В качестве источника когерентного излучения использовался гелий-неоновый лазер JDSU 1145AP ($\lambda = 633$ нм) с максимальной мощностью 20 мВт или твердотельный лазер LCS-DTL-317 с диодной накачкой ($\lambda = 532$ нм) с максимальной мощностью 50 мВт. Делительный кубик 2 использовался для разделения лазерного излучения на опорную и сигнальную волну; четвертьволновая пластина 5 и поляризатор 7 – для задания поляризационных характеристик сигнальной и опорной волн, оптимальных при реализации линейного режима фазовой демодуляции. Фазовая модуляция сигнальной волны осуществлялась с помощью зеркала, приклеенного к пьезокерамическому цилиндру, на частоте 1,15 кГц. Электрический сигнал от звукового генератора ГЗ-112 подавался на пьезокерамику через согласующий трансформатор, имеющий коэффициент трансформации 26. Амплитуда электрического сигнала на цилиндре изменялась от 0,005 до 350 В, что соответствовало изменению амплитуды вибрации зеркала, моделирующего колеблющийся объект 4, от 0,0051 до 306 нм.

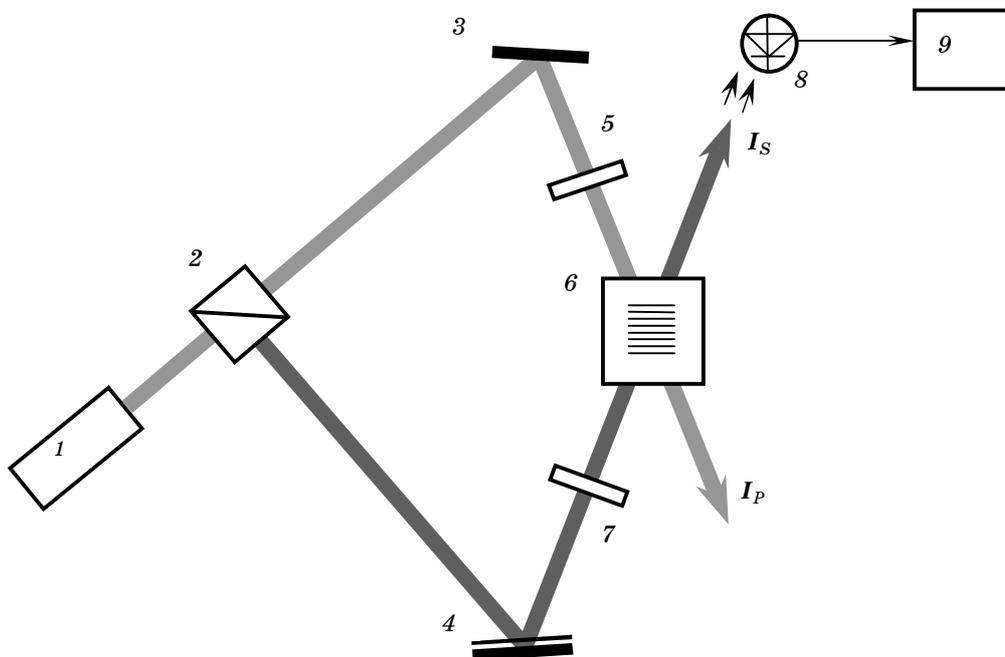


Рис. 2. Схема голографического интерферометра, использующего встречное взаимодействие волн, имеющих различную поляризацию: 1 – лазер; 2 – делительный кубик; 3 – неподвижное зеркало; 4 – колеблющийся объект; 5 – четвертьволновая пластина; 6 – фоторефрактивный кристалл $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Fe}, \text{Cu}$ среза (100); 7 – поляризатор; 8 – фотодиод; 9 – селективный вольтметр

Сигнальная волна, отражающаяся от колеблющегося объекта 4, имеет значительно меньшую интенсивность, чем опорная. После поляризатора 7 она проходит через фото-рефрактивный кристалл 6 ($\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Fe,Cu}$, срез (100)) и попадает на фотоприемник 8, в качестве которого использовался фотодиод ФД-24 К, нагруженный на сопротивление $R_H = 8,8$ кОм, при напряжении смещения 12 В. Сигнал фазовой демодуляции на частоте 1,15 кГц выделялся селективным вольтметром с полосой анализа $\Delta f = 20$ Гц.

Экспериментальные зависимости амплитуды сигнала демодуляции, измеряемой селективным вольтметром на сопротивлении нагрузки фотоприемника, от амплитуды колебаний зеркала $l = \varphi_m \lambda / (4\pi)$, представлены квадратами (при $\lambda = 532$ нм) и кружками (633 нм) на рис. 3.

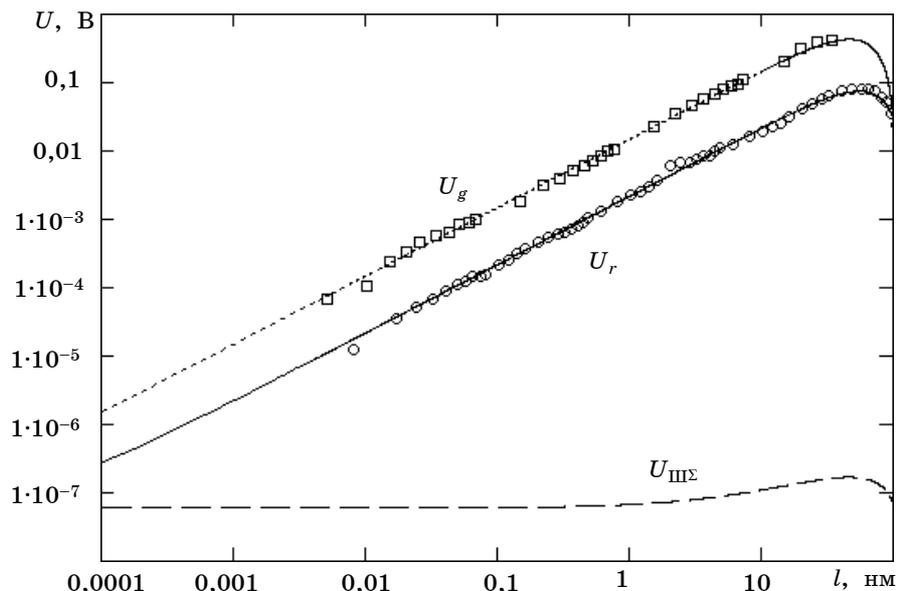


Рис. 3. Зависимость амплитуды выходного напряжения голографического интерферометра от амплитуды колебаний отражателя: U_g – при использовании лазера с длиной волны 532 нм; U_r – для лазера с $\lambda=633$ нм; $U_{III\Sigma}$ – суммарное напряжение шума. \square – экспериментальные данные для $\lambda = 532$ нм; \circ – для $\lambda = 633$ нм

Таким образом, использование в интерферометре лазера с длиной волны 532 нм позволило измерить колебания отражающей поверхности с амплитудой 0,005 нм, в то время как при $\lambda=633$ нм минимальная амплитуда измеряемых колебаний составила 0,008 нм.

Для определения минимально возможных для детектирования колебаний учтем дробовые и тепловые шумы фотодиода и просуммируем их с сигналом демодуляции, выделяемым селективным вольтметром. Используя известные соотношения для фотодиодного режима детектирования [6] и формулы (3) и (4) для интенсивности амплитудно-модулированного на частоте Ω светового сигнала, сумму напряжений электрического сигнала $U_{\Omega}(l)$ и шума $U_{III\Sigma}$ можно представить в виде

$$U_{\Omega}(l) + U_{III\Sigma} = R_H S_{ph} J_0(2kl) J_1(2kl) \frac{\Gamma I}{\rho} \sin(\rho d) \cos(\rho d - 2\theta_{S0}) P_S + \sqrt{\Delta f \left[2eR_H^2 \left(S_{ph} J_0(2kl) J_1(2kl) \frac{\Gamma I}{\rho} \sin(\rho d) \cos(\rho d - 2\theta_{S0}) P_S + I_T \right) + 4k_B T R_H \right]}, \quad (5)$$

где e – элементарный заряд; S_{ph} – токовая монохроматическая чувствительность и I_T – темновой ток фотодиода; k_B – постоянная Больцмана; T – температура; $k=2\pi/\lambda$; $P_S = I_{S0}(1-R^2)^2 \exp(-\alpha d) S$ и S – площадь поперечного сечения сигнального светового пучка.

На рис. 3 представлены рассчитанные по формуле (5) зависимости измеряемого напряжения для голографического интерферометра, использующего излучение с длиной волны 532 нм ($U_g(l)$, точечная кривая) и с $\lambda = 633$ нм ($U_r(l)$, сплошная кривая), а также

зависимость $U_{\text{ШС}}(I)$ (пунктирная кривая). В расчетах использовались справочные данные фото диода ФД-24К $S_{ph} = 4$ А/Вт, $I_T = 1,2$ мкА [7]; параметры используемого кристалла $R = 0,19$, $d = 1,15$ мм; экспериментально измеренные для него значения $\rho = 9$ град/мм, $\Gamma_I = 12$ см⁻¹, $\alpha_g = 10$ см⁻¹ ($\lambda = 532$ нм) и $\rho = 6,34$ град/мм, $\Gamma_I = 2,04$ см⁻¹, $\alpha_r = 1$ см⁻¹ ($\lambda = 633$ нм), а также задаваемые в экспериментах входные поляризационные углы $\theta_{S0} = 0^\circ$ (при $\lambda = 532$ нм) и $\theta_{S0} = 8^\circ$ (при $\lambda = 633$ нм). Для лазера с длиной волны 532 нм входная мощность сигнального пучка $P_{S0} = I_{S0}S$ оценивалась в 0,2 мВт, в то время как для гелий-неонового лазера она составляла ~0,04 мВт.

Заключение

В работе теоретически и экспериментально исследована амплитудная характеристика адаптивного голографического интерферометра на основе встречного двухволнового взаимодействия в кристаллах титаната висмута среза (100), предназначенного для измерения амплитуды вибраций зеркальной отражающей поверхностей. Получено, что использование в интерферометре лазера с длиной волны 532 нм позволяет измерить колебания зеркально отражающей поверхности с амплитудой 0,005 нм.

Литература

1. Петров М.П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М.П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко. – СПб.: Наука, 1992. – 320 с.
2. Kamshilin A.A. Adaptive correlations filter for stabilization of interference-fiber-optic sensors / A.A. Kamshilin, T. Jaaskelainen, Yu.N. Kulchin // Appl. Phys. Lett. – 1998. – №73. – P. 705–707.
3. Плесовских А.М. Векторное двухволновое взаимодействие на отражательных голографических решетках в кубических гиротропных фоторефрактивных кристаллах / А.М. Плесовских и др. // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35. – С. 163–168.
4. Ромашко Р.В. Адаптивный интерферометр на основе анизотропной дифракции на фоторефрактивной отражательной голограмме / Р.В. Ромашко и др. // Известия РАН. Сер. физич. – 2006. – Т. 70, № 9. – С. 1296–1300.
5. Shandarov S.M. Two-wave mixing on reflection dynamic gratings in sillenite crystals under phase modulation of signal beam / S.M. Shandarov et al. // Physics of Wave Phenomena. – 2009. – Vol. 17, № 1. – P. 39–45.
6. Анисимова И.Д. Полупроводниковые фотоприемники / И.Д. Анисимова и др. – М.: Радио и связь, 1984. – 216 с.
7. Аксененко М.Д. Приемники оптического излучения: Справочник / М.Д. Аксененко, М.Л. Баранчиков. – М.: Радио и связь, 1987. – 296 с.

Колегов Алексей Анатольевич

Аспирант каф. электронных приборов ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-35-07; +7-905-990-46-49
Эл. почта: kolegov@sibmail.com

Шандаров Станислав Михайлович

Д-р физ.-мат. наук, зав. каф. электронных приборов ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-38-87
Эл. почта: shand@ed.tusur.ru

Каргин Юрий Федорович

Д-р хим. наук, зав. лаб. физико-химического анализа керамических материалов
Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва
Тел.: (495) 718-16-55
Эл. почта: yu.kargin@rambler.ru

Kolegov A.A., Shandarov S.M., Kargin Yu.F.

The amplitude characteristic of an adaptive holographic interferometer

The results of theoretical analysis and experimental investigations of the output signal amplitude dependence on vibrations amplitude of mirror reflecting object for the adaptive holographic interferometer, which is based on the counter interaction in a (100)-cut cubic photorefractive crystal.

Keywords: holographic interferometer, dynamic reflective hologram, two-wave interaction, phase modulation.