

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

С.М. Шандаров
С.С. Шамаков

**ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АДАПТИВНОГО
ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА В ШИРОКОМ ДИНАМИЧЕСКОМ
ДИАПАЗОНЕ**

Методические указания по лабораторной работе
для студентов технических направлений подготовки

Томск 2024

УДК 535:53(075.8)
ББК 22.34я73
Ш201

Шандаров, Станислав Михайлович

Ш201 Исследование амплитудной характеристики адаптивного голографического интерферометра в широком динамическом диапазоне: Методические указания по лабораторной работе для студентов технических направлений подготовки / С.М. Шандаров, С.С. Шмаков. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 14 с.

Представлены методические указания по лабораторной работе для студентов технических направлений подготовки. Цель работы: изучение зависимости выходного отклика адаптивного интерферометра, использующего динамические отражательные голограммы в кубических фоторефрактивных кристаллах силленитов, от амплитуды механических колебаний зеркально отражающего объекта, в диапазоне от единиц пикометров до 150 нанометров.

Одобрено на заседании каф. ЭП, протокол № 05-24 от 08.05.2024 г.

УДК
535:53(075.8)
ББК 22.34я73

© Шандаров С.М., С.С. Шмаков 2024

© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024

Содержание

1 Введение.....	5
2 Теоретическая часть.....	5
2.1 Принцип голографической интерферометрии при встречном взаимодействии в кубическом фоторефрактивном гиротропном кристалле среза (100).....	5
2.2 Амплитудная характеристика адаптивного интерферометра, использующего встречное взаимодействие в кубическом фоторефрактивном гиротропном кристалле среза (100)	8
2.3 Контрольные вопросы.....	10
3 Экспериментальная часть.....	11
3.1 Лабораторная установка	11
3.2 Задание на работу	11
3.3 Порядок выполнения работы и методические указания.....	12
3.4 Содержание отчета	14
Список литературы	14

1 Введение

Оптические и акустооптические методы обработки информации используют различные оптические транспаранты, в том числе объемные среды, в которых могут формироваться фазовые динамические голограммы, информация в которых хранится в виде изменений показателя преломления. Эти голограммы могут быть использованы для голографической интерферометрии, а их динамический характер делает их адаптивными к медленным изменениям внешних условий, обусловленных дрейфом температуры, атмосферного давления, и других факторов [1-5].

В качестве сред для динамической голографии, в которых могут формироваться объемные фазовые голограммы, широко используются фоторефрактивные кристаллы. Они характеризуются высокой разрешающей способностью, превышающей 10 000 линий на миллиметр.

Фоторефрактивные кубические кристаллы силленитов $\text{Bi}_{12}\text{MO}_{20}$ ($M = \text{Ge}, \text{Si}, \text{Ti}$) характеризуются быстрым нелинейным откликом и обладают естественной оптической активностью. Интерес к данным кристаллам связан с возможностью их использования в прикладных устройствах оптической обработки информации и динамической голографии. Максимальная эффективность взаимодействия без приложенного к кристаллу внешнего электрического поля может быть получена в этих кристаллах при встречном распространении пучков, формирующих голограмму. В этом случае амплитуда фоторефрактивной решетки, формирующейся за счет диффузионного механизма, в отсутствие насыщения ловушек обратно пропорциональна ее периоду. Отражательные решетки и схемы на их основе могут быть использованы для создания узкополосных оптических фильтров, голографических интерферометров и для других практических применений.

Целью настоящей работы является знакомство с принципом голографической интерферометрии и экспериментальное изучение амплитудной характеристики адаптивного голографического интерферометра, использующего отражательные фоторефрактивные голограммы в кристаллах титаната висмута для измерения амплитуды механических колебаний зеркально отражающего объекта, в широком динамическом диапазоне.

2 Теоретическая часть

2.1 Принцип голографической интерферометрии при встречном взаимодействии в кубическом фоторефрактивном гиротропном кристалле среза (100)

При взаимодействии лазерных пучков (I_S и I_P на рис. 2.1) в фоторефрактивном кристалле формируется динамическая голограмма, на которой одновременно происходит их самодифракция [1-6]. Здесь имеет место интерференция каждого из прошедших пучков с одним из

дифрагировавших пучков, то есть опорный пучок I_P интерферирует с I_{S1} , а I_S – с I_{P1} . Интенсивность прошедшего через кристалл сигнального пучка можно представить в виде

$$I = I_0 (1 + m \cos \Delta\varphi), \quad (2.1)$$

где $m = 2\sqrt{I_S I_{P1}}/I_0$ – интерференционный контраст, I_0 – суммарная интенсивность пучков I_S и I_{P1} , а $\Delta\varphi$ – фазовый сдвиг между ними.

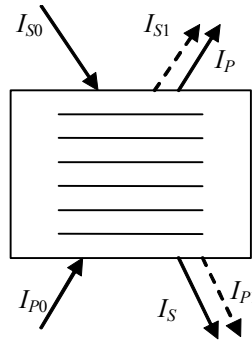


Рисунок 2.1 – Голографический интерферометр, использующий встречное взаимодействие световых пучков на фоторефрактивной отражательной голограмме

Если входной сигнальный пучок I_{S0} получен отражением от объекта, колеблющегося с частотой Ω , то он имеет фазовую модуляцию,

$$\Delta\varphi = \varphi_0 + \varphi_m \cos \Omega t, \quad (2.2)$$

и его выходная интенсивность после взаимодействия на голограмме со стационарным опорным пучком будет амплитудно-модулированной на кратных частотах $n\Omega$, с распределением глубины модуляции $M^{(n)}(\varphi_0)$, зависящим от φ_0 . Для $\varphi_0=0, \pi$ первая гармоника в спектре отсутствует ($M^{(1)}=0$), и наблюдается квадратичный режим фазовой демодуляции, при котором максимум модуляции имеет место на частоте 2Ω [1]. Предпочтительным для приложений является линейный режим фазовой демодуляции, реализующийся при $\varphi_0=\pi/2$ на основной частоте Ω [1-5]. В этом случае, при малых амплитудах фазовой модуляции, $m \sim \varphi_m$.

Величина фазового сдвига φ_0 для дифрагированного поля, складывающаяся из разности фаз между фоторефрактивной решеткой и интерференционной картиной, и дополнительного сдвига для дифракции на фазовой решетке, определяется механизмом записи голограммы. При диффузионном механизме (в отсутствие внешнего электрического поля) и дифракции без изменения поляризационного состояния суммарный фазовый сдвиг равен 0 или π , что соответствует квадратичному режиму фазовой демодуляции. В случае дрейфовой записи, когда к кристаллу приложено постоянное электрическое поле, и такого же режима дифракции на фазовой голограмме, достигается линейный режим фазовой демодуляции за счет обеспечения фазового сдвига на $\pi/2$ или $-\pi/2$ [1]. Однако сильное постоянное

электрическое поле, прикладываемое к кристаллу, приводит к его перегреву.

При анизотропной дифракция световой волны на динамической голограмме, когда имеет место изменение поляризационного состояния дифрагированного поля на ортогональное к исходному, возможно линейное преобразования модуляции фазы сигнальной волны в изменение ее мощности и при механизме записи диффузионного типа [2-5]. Оно реализуется при смещении двух волн с различным типом поляризации: одна волна должна иметь линейную поляризацию, другая – эллиптическую или круговую. Линейность демодуляции достигается за счет того, что внутренняя разность фаз в $\pi/2$ между ортогональными компонентами эллиптически поляризованной волны переносится в интерференцию прошедшей сигнальной волны и дифрагированного поля опорной волны, обеспечивая тем самым необходимый дополнительный фазовый сдвиг между ними.

В работе [7] 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 для глубины модуляции интенсивности на нулевой, первой и второй гармониках сигнала:

$$I_S(-d, t) \sim I_{sd} \left[M^{(0)}(-d) + M^{(1)}(-d) \sin \Omega t + M^{(2)}(-d) \cos 2\Omega t + \dots \right], \quad (2.3)$$

$$M^{(0)}(-d, \varphi_m) = 1 + J_0^2(\varphi_m) \frac{\Gamma_I}{2\rho} \sin(\rho d) \left[\sin(\rho d - 2\theta_{s0}) + \frac{\Gamma_I}{4\rho} \sin(\rho d) \right], \quad (2.4)$$

$$M^{(1)}(-d, \varphi_m) = J_0(\varphi_m) J_1(\varphi_m) \frac{\Gamma_I}{\rho} \sin(\rho d) \cos(\rho d - 2\theta_{s0}), \quad (2.5)$$

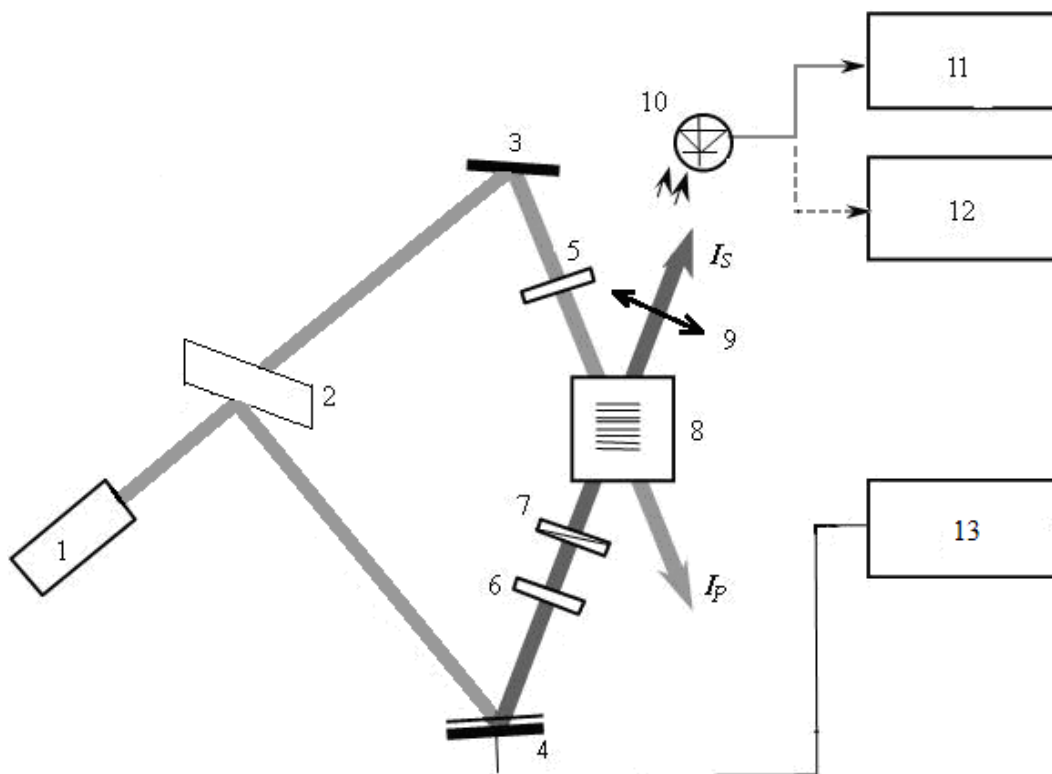
$$M^{(2)}(-d, \varphi_m) = J_0(\varphi_m) J_2(\varphi_m) \frac{\Gamma_I}{\rho} \sin(\rho d) \sin(\rho d - 2\theta_{s0}), \quad (2.6)$$

где $I_{sd} = (1 - R^2)^2 I_{s0} \exp(-\alpha d)$ – интенсивность сигнального пучка на выходной грани кристалла в отсутствие опорного пучка; R – френелевский коэффициент отражения от граней кристалла; α – коэффициент поглощения света; 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; Γ_I – коэффициент усиления, характеризующий эффективность взаимодействия пучков; J_n – функция Бесселя n -го порядка.

Таким образом, 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.

2.2 Амплитудная характеристика адаптивного интерферометра, использующего встречное взаимодействие в кубическом фоторефрактивном гиротропном кристалле среза (100)

На рис. 2.2 представлена схема лабораторной установки, представляющей макет исследуемого голографического интерферометра, предназначенного для измерения спектра колебаний зеркально отражающих объектов.



1 - He-Ne- лазер; 2 - делительная пластина; 3 - зеркало; 4 – пьезокерамический цилиндр с зеркалом; 5, 6 – четвертьволновые пластины; 7 – поляризатор; 8 – кристалл $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ среза (100); 9 – собирающая линза; 10 – фотоприемник; 11 – селективный вольтметр; 12 – милливольтметр; 13 – генератор синусоидальных сигналов.

Рисунок 2.2 – Схема голографического интерферометра, использующего встречное взаимодействие волн, имеющих различную поляризацию

В качестве регистрирующей среды в установке используется фоторефрактивный кристалл $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ среза (100). Источником когерентного излучения служит гелий-неоновый лазер 1 ($\lambda=633$ нм) с максимальной выходной мощностью 20 мВт. Делительный кубик 2 применяется для разделения лазерного излучения на опорный и сигнальный пучки, которые с помощью зеркал 3 (неподвижное) и 4 (колеблющееся) создают в кристалле картину интерференции стационарной опорной волны с фазово-модулированной сигнальной волной. Четвертьволновая пластина 5 задает

круговую поляризацию опорной волны, а четвертьволновая пластина 6 и поляризатор 7 позволяют задать нужный угол θ_{s0} между вектором поляризации сигнальной волны для реализации линейного и квадратичного режимов фазовой демодуляции.

Фазовая модуляция сигнальной волны осуществляется с помощью зеркала, приклеенного к пьезокерамическому цилиндру, на частотах от 300 Гц до 10 кГц. Электрический сигнал от звукового генератора 13 типа ГЗ-112 подается на пьезокерамику через согласующий трансформатор, а его амплитуда на цилиндре может изменяться от 0,001 до 350 В, что позволяет задавать амплитуду вибрации зеркала, моделирующего колеблющийся объект 4, от 0,8 пм до 300 нм. Ввиду малого угла падения сигнальной волны на колеблющееся зеркало, составляющего около 10^0 , связь амплитуды её фазовой модуляции с амплитудой механических колебаний l может быть найдена из приближенного соотношения $\varphi_m \approx 4\pi l / \lambda$.

Сигнальная волна, отражающаяся от зеркала 4 и имеющая значительно меньшую интенсивность, чем опорная, интерферирует с последней и формирует в кристалле 8 благодаря фоторефрактивному эффекту стационарную фазовую голограмму. После прохождения кристалла, в результате дифракции опорной волны на данной голограмме, она приобретает амплитудную модуляцию и регистрируется фотоприемником 10 (фотодиод ФД-256 К, нагруженный на сопротивление $R_H = 39$ кОм, при напряжении обратного смещения 10 В). Амплитуды напряжения для первой и второй гармоник сигнала фазовой демодуляции измеряются на сопротивлении нагрузки при помощи селективного вольтметра 11 марки Unipan 237, а постоянная составляющая сигнала – милливольтметром постоянного напряжения 12 типа В7-78/1.

Минимальная амплитуда механических колебаний, которая может быть измерена рассматриваемым голографическим интерферометром, ограничивается шумами лазера и фотоприемного устройства. Учитывая, что фотодиоды характеризуются тепловыми, дробовыми и избыточными шумами [8], рассмотрим их влияние на предельную чувствительность интерферометра к регистрации механических колебаний гармонического типа.

В фотодиодном режиме детектирования [9], который используется в схеме интерферометра, с учетом соотношений (2.3) и (2.5) напряжение информационного сигнала $U_\Omega(l)$, измеряемое селективным вольтметром на первой гармонике частоты колебаний зеркала Ω , может быть получено в виде

$$U_\Omega(l) = R_H S_{ph} J_0(2k_0 l) J_1(2k_0 l) \frac{\Gamma_l}{\rho} \sin(\rho d) \cos(\rho d - 2\theta_{s0}) P_S, \quad (2.7)$$

где S_{ph} – токовая монохроматическая чувствительность фотодиода, $k_0 = 2\pi/\lambda$ и P_S – выходная мощность сигнального пучка в отсутствие накачки. Квадрат шумового напряжения $U_{\Sigma N}^2$, выделяемого селективным вольтметром в полосе анализа Δf , определяется суммой из трех слагаемых,

соответствующих вкладу мощностей шумов дробового, теплового и избыточного типов [8]:

$$U_{\Sigma N}^2 = 2e\Delta f R_H^2 (S_{ph} P_0 + I_T) + 4kTR_H + B\Delta f R_H^2 (S_{ph} + I_T)^{\nu}, \quad (2.8)$$

где e – элементарный электрический заряд; P_0 – средняя мощность сигнального пучка при наличии накачки; I_T – темновой ток фотодиода; k_B – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура. Параметры B и ν здесь определяются используемой моделью избыточного шума, для которого также используются названия «фликкер-шум» и « $1/f$ -шум». Последнее название связано с часто используемой в качестве модели эмпирической частотной зависимостью фликкер-шума [8]:

$$B = \frac{A}{f^{\beta}}, \quad (2.9)$$

где A – параметр, определяемый экспериментально; f – частота, на которой он наблюдается (в нашем случае – частота, на которой сигнал измеряется селективным вольтметром). Обычно принимается, что параметр $\beta \approx 1$, а $\nu \approx 2$.

Итоговое напряжение, измеряемое селективным вольтметром, в которое дает вклад как сигнал $U_{\Omega}(l)$, так и шум $U_{\Sigma N}$, с учетом некогерентного характера суммирования может быть представлено в виде

$$\langle U_{\Omega}(l) + U_{\Sigma N} \rangle = \sqrt{U_{\Omega}^2(l) + U_{\Sigma N}^2}. \quad (2.10)$$

Средняя мощность сигнального пучка при наличии накачки, с учетом формул (2.3) и (2.4) может быть рассчитана из следующего выражения:

$$P_0 = \left\{ 1 + J_0^2(\varphi_m) \frac{\Gamma_l}{2\rho} \sin(\rho d) \left[\sin(\rho d - 2\theta_{s0}) + \frac{\Gamma_l}{4\rho} \sin(\rho d) \right] \right\} P_s. \quad (2.11)$$

Таким образом, амплитудная характеристика рассмотренного голографического интерферометра, представляющая зависимость измеряемого селективным вольтметром напряжения на частоте первой гармоники механических колебаний объекта от их амплитуды, может быть получена из уравнения (2.10) с учетом соотношений (2.7)-(2.9) и (2.11). Отметим, что полученные соотношения не учитывают избыточных шумов используемого лазера и содержат некоторые параметры фотодиода, которые должны быть определены экспериментально.

2.3 Контрольные вопросы

1. Каким образом реализуется фазовая демодуляция в голографическом интерферометре?
2. На какой частоте реализуется линейный режим фазовой демодуляции в голографическом интерферометре? Как связан выходной сигнал интерферометра в данном режиме с глубиной фазовой модуляции?
3. На какой частоте реализуется квадратичный режим фазовой демодуляции в голографическом интерферометре?

4. Каким должен быть суммарный фазовый сдвиг дифрагированного светового поля относительно начальной фазы сигнальной волны для реализации линейного режима фазовой демодуляции?

5. Каким образом можно обеспечить линейный режим фазовой демодуляции при диффузионном механизме формирования фоторефрактивных голограмм?

6. Что такое амплитудная характеристика голографического интерферометра?

7. Чем ограничивается чувствительность голографического интерферометра к измерению механических колебаний отражающих объектов?

8. Какие виды шумов присутствуют в выходном сигнале голографического интерферометра?

3 Экспериментальная часть

3.1 Лабораторная установка

Схема лабораторной установки, используемой в настоящей работе, изображена выше на рис. 2.2 и описана в подразд. 2.2. Известные данные по параметрам кристалла и используемого фотоприемника сообщаются преподавателем.

3.2 Задание на работу

3.2.1. Вывести соотношения (2.7) и (2.11), используя формулы (2.3)-(2.5) и известные соотношения, описывающие связь выходного напряжения фотодиодного приемника с мощностью монохроматического светового пучка.

3.2.2. Вывести выражение для интенсивности светового пучка, являющегося суперпозицией двух монохроматических световых волн с одинаковыми частотами и направлениями распространения, но с разными начальными фазами.

3.2.3. Собрать и настроить экспериментальную установку согласно рис. 2.2.

3.2.4. Снять зависимость амплитуды выходного сигнала интерферометра на первой гармонике частоты модуляции от амплитуды колебаний зеркала.

3.2.5. Построить экспериментальную амплитудную характеристику голографического интерферометра в предоставленной преподавателем программе в пакете Mathcad; здесь же построить расчетную зависимость, выполнив подгонку по методу наименьших квадратов под экспериментальные данные путем подбора значений неизвестных параметров кристалла ВТО и фотоприемника.

3.2.6. Подготовить и распечатать отчет по проделанной работе.

3.3 Порядок выполнения работы и методические указания

3.3.1. Работа выполняется в порядке, который определен заданием, приведенным выше в подразд. 3.2.

3.3.2. При подготовке установки к эксперименту следует учесть следующее. Как отмечалось выше в подразд. 2.1, при определенной ориентации вектора поляризации сигнального пучка можно реализовать линейный режим фазовой демодуляции. В этом случае на осциллографе, который на схеме установки не показан, будет наблюдаться неискаженный синусоидальный сигнал с частотой, равной частоте механических колебаний зеркала. Настройку вращением поляризатора 7 следует проводить при напряжении на пьезокерамическом цилиндре, составляющем от 20 до 50 В.

3.3.3. В ходе выполнения работы необходимо снять зависимость амплитуды выходного сигнала, измеряемого селективным вольтметром на частоте первой гармоники, от амплитуды напряжения, подаваемого на пьезокерамический цилиндр. При высоких напряжениях, от 50 до 200 В, необходимо зафиксировать некоторое значение этого напряжения, при котором выходной сигнал принимает значение, близкое к нулевому. Для прикладываемого напряжения со значениями, составляющими единицы милливольт, нужно зафиксировать несколько экспериментальных точек, при которых уменьшение амплитуды колебаний не приводит к уменьшению выходного сигнала интерферометра.

Для подгонки теоретической зависимости под экспериментальные данные необходимо измерить мощность сигнального пучка P_S на выходе интерферометра в отсутствие опорного пучка. Для этого опорный пучок перекрывается непрозрачным экраном между четвертьволновой пластиной 5 и кристаллом и после релаксации записанной голограммы (за время порядка 60 с) милливольтметром измеряется постоянное напряжение на сопротивлении нагрузки светодиода. Далее, с использованием известного значения S_{ph} фотодиода, рассчитывается значение P_S .

Экспериментальные данные рекомендуется заносить в таблицу. В качестве примера ниже приведена табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты экспериментов и расчетов

$U_c, \text{В}$	$U_\Omega, \text{мВ}$	$l, \text{нм}$	$\varphi_m, \text{рад}$	$ M^{(1)} $
200				
180				
...				
0,001				

Для отображения полученных амплитудных зависимостей рекомендуется использование пакета программ Mathcad. Пример графиков, на которых представлены амплитудные характеристики интерферометра при больших амплитудах колебаний (линейный масштаб) и в широком динамическом диапазоне (в логарифмическом масштабе) приведены на рис. 3.1а и 3.1б, соответственно.

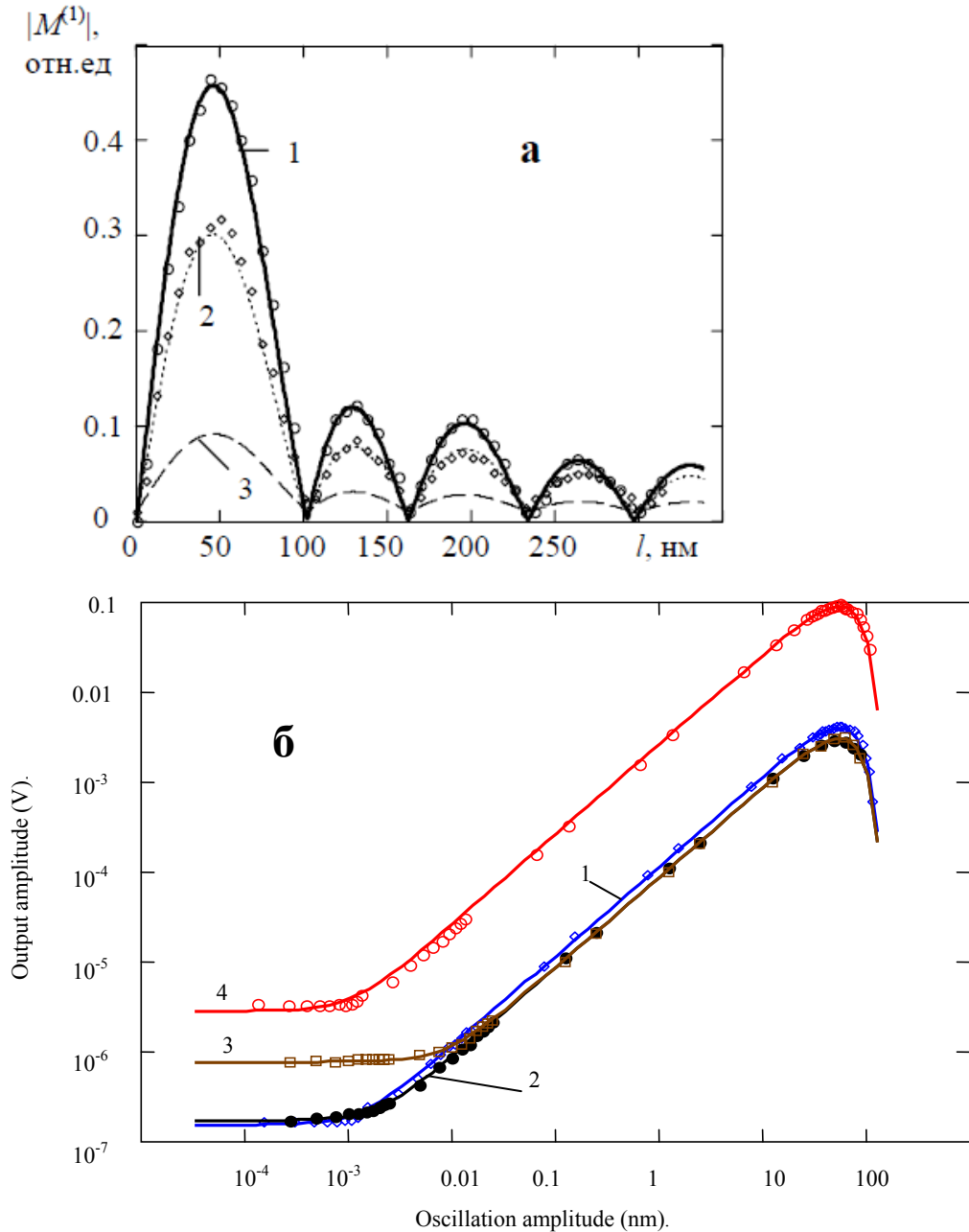


Рисунок 3.1 - Примеры амплитудных характеристик адаптивного голографического интерферометра

3.4 Содержание отчета

3.4.1. При составлении отчета необходимо руководствоваться общими требованиями и правилами оформления отчета о лабораторной работе.

3.4.2. В соответствующих разделах отчета необходимо представить:

- 1) задание;
- 2) схему экспериментальной установки;
- 3) таблицы экспериментальных данных;
- 4) результаты расчетов, предусмотренных заданием;
- 5) графики амплитудных зависимостей;
- 6) выводы.

Список литературы

1. М.П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. – С.-Петербург: Наука, 1992. – 320с.
2. С.М. Шандаров, Н.И. Буримов, Ю.Н. Кульчин, Р.В. Ромашко, А.Л. Толстик, В.В. Шепелевич. Динамические голограммы Денисюка в кубических фоторефрактивных кристаллах // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38, №11. – С. 1059-1069.
3. А.А. Kamshiln, R.V. Romashko, Yu.N. Kulchin. Adaptive interferometry with photorefractive crystals // J. Appl. Phys. – 2009. – V. 105. – P. 031101.
4. А.А. Колегов, С.М. Шандаров, Г.В. Симонова, Л.А. Кабанова, Н.И. Буримов, С.С. Шмаков, В.И. Быков, Ю.Ф. Каргин. Адаптивная интерферометрия, использующая динамические отражательные голограммы в кубических фоторефрактивных кристаллах // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41, № 9. – С. 847-852.
5. Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.А. Камшилин, Р.В. Ромашко. Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 288 с.
6. T.J. Hall, M.A. Fiddy, M.S. Ner. Detector for an optical-fiber acoustic sensor using dynamic holographic interferometry // Opt. Lett. – 1980. – V. 5. – P. 485-487.
7. S.M. Shandarov, A.A. Kolegov, N.I. Burimov, V.I. Bykov, V.M. Petrov, Yu.F. Kargin. Two-wave mixing on reflection dynamic gratings in sillenite crystals under phase modulation of signal beam // Phys. Wave Phenomena. – 2009. – V. 17. – P. 39-44.
8. М. Росс. Лазерные приемники. – М.: Мир, 1969. – 520 с.
9. Анисимова И.Д., Викулин И.М., Зайтов Ф.А., Курмашев Ш.Д. Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра. – М.: Радио и связь, 1984. – 216 с.

10. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах : монография / С.М. Шандаров, В.М. Шандаров, А.Е. Мандель, Н.И. Буримов. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 242 с., http://edu.tusur.ru/training/publications?chair_id=13&page=17.

11. Взаимодействие световых волн на отражательных голографических решетках в кубических фоторефрактивных кристаллах : сб. статей / под ред. С.М. Шандарова и А.Л. Толстика. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. И радиоэлектроники, 2007. – 100 с.

12. Плесовских А.М., Шандаров С.М., Мартьянов А.Г., Мандель А.Е., Буримов Н.И., Шаганова Е.А., Каргин Ю.Ф., Волков В.В., Егорышева А.В. Векторное двухволновое взаимодействие на отражательных голографических решетках в кубических гиротропных фоторефрактивных кристаллах // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35. – С.163–168.

13. Е.Ю. Агеев, С.М. Шандаров, С.Ю. Веретенников, А.Г. Мартьянов, В.А. Каташов, А.А. Камшилин, В.В. Прокофьев, В.В. Шепелевич. Двухволновое взаимодействие на отражательной решетке в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31, №4. – С. 343-345.