

11. Адаптивная голографическая интерферометрия в приложении к определению материальных параметров фоточувствительных кристаллов

С. М. Шандаров¹, А. О. Злобин¹, Н. И. Буримов¹, А. А. Шмидт¹, К. П. Мельник¹,
С. С. Шмаков¹, В. В. Шепелевич², И. А. Соколов³, М. А. Брюшинин³

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, Россия

² Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина,
Мозырь, Беларусь

³ Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрено применение методов голографической интерферометрии, основанных на взаимодействии стационарного опорного светового пучка с фазово-модулированным сигнальным пучком на создаваемых ими возмущениях диэлектрического тензора в фоточувствительных кристаллах, для измерения материальных параметров, определяющих величину этих возмущений. Определены экспериментальные условия, при которых возможно выделение вкладов во взаимодействие флексоэлектрического и электрогирационного эффектов в кубических фоторефрактивных кристаллах класса силленитов; показана необходимость учета вклада в него эффекта флексогирации.

Ключевые слова: Адаптивная голографическая интерферометрия, Фоточувствительные кристаллы, Фоторефрактивный эффект, Обратный флексоэлектрический эффект, Двухпучковое взаимодействие..

Цитирование: Шандаров, С. М. Адаптивная голографическая интерферометрия в приложении к определению материальных параметров фоточувствительных кристаллов / С. М. Шандаров, А. О. Злобин, Н. И. Буримов, А. А. Шмидт, К. П. Мельник, С. С. Шмаков, В. В. Шепелевич, И. А. Соколов, М. А. Брюшинин // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 74–80.

Введение

Методы адаптивной голографической интерферометрии широко используются для реализации высокочувствительных одноканальных и многоканальных измерительных систем, основанных на преобразовании нестационарной фазовой модуляции оптических сигналов в амплитудно-модулированный сигнал [1–5]. Для фазовой демодуляции в лазерных интерферометрах голографического типа используется взаимодействие между сигнальным световым пучком и стационарной опорной волной на динамической голограмме, формируемой ими в реверсивной среде. Предложение об использовании фоторефрактивных кристаллов в качестве такой реверсивной среды [6] стало основой для многочисленных работ [1–4, 7–9], посвященных как анализу физических явлений при взаимодействии на фоторефрактивных голо-

граммах двух световых волн, одна из которых является фазово-модулированной, так и разработке реальных измерительных устройств и систем. Фоторефрактивные голограммы, имеющие динамический характер при конечном времени быстрогодействия среды τ , обеспечивают компенсацию дрейфа рабочей точки интерферометра при низкочастотной модуляции с частотами $\Omega_e \ll 1/\tau$, вызванного изменением внешних условий (температуры, давления, механических вибраций и т. п.). Поэтому взаимодействие на них позволяет осуществлять адаптивную фазовую демодуляцию сигнального пучка, несущего информацию о нестационарных возмущениях с частотами $\Omega > 1/\tau$.

Сигнал фазовой демодуляции в фоторефрактивных кристаллах характеризуется временным спектром, который определяется видом отклика среды при заданных поляризационных параметрах взаимодействующих световых пучков, зависящего также от кристаллографической ориентации образца и вклада в него различных механизмов возмущения оптических свойств формируемой динамической голограммой [1–4, 9–12]. Высокая чувствительность эффективности фазовой демодуляции позволяет успешно применять методы голографической интерферометрии для определения величины вклада в неё различных вторичных эффектов и соответствующих им материальных параметров фоторефрактивных кристаллов [10–14]. В настоящем докладе представлены результаты теоретического анализа и экспериментального исследования фазовой демодуляции при попутном взаимодействии волн с одинаковой циркулярной поляризацией в кристалле силиката висмута среза (110). Продемонстрирована возможность оценки из экспериментальных данных его коэффициента флексоэлектрической связи f_{1111} , электрогирационной постоянной γ_{41} и эффективного флексогирационного параметра $\beta_{1122} + \beta_{2211}$.

1. Фазовая демодуляция для волн с циркулярной поляризацией в кристаллах класса силленитов

Взаимодействие на фоторефрактивной голограмме сильной стационарной опорной волны со слабой сигнальной волной, несущей информацию в виде фазовой модуляции гармоническим сигналом с частотой Ω , приводит к эффекту фазовой демодуляции [2, 15]. При этом интенсивность сигнальной волны на выходной грани кристалла может быть представлена в виде разложения

$$I_S(t) \approx I_{S0} \left[M^{(0)} + M^{(1)} \sin \Omega t + M^{(2)} \cos 2\Omega t + \dots \right], \quad (1)$$

в котором относительные амплитуды гармоник $M^{(n)}$ зависят от глубины фазовой модуляции φ_m , поляризации взаимодействующих волн на входной грани кристалла, вида фоторефрактивного отклика и его параметров для рассматриваемого двухволнового взаимодействия. Использование известного подхода к анализу взаимодействия световых волн с чисто циркулярной поляризацией на фоторефрактивных голограммах диффузионного типа в кристаллах класса силленитов, учитывающего вклад в него обратного флексоэлектрического эффекта [10–12], позволило получить следующие выражения для относительных амплитуд первой и второй гармоник в информационном сигнале в случае образцов среза (110):

$$M^{(1)}(\varphi_m) = 4J_0(\varphi_m)J_1(\varphi_m)\exp\left(-\frac{\Gamma_E}{2}d\right)\sin\left(\frac{\Gamma_f}{2}d\right) = 4M_{1m}J_0(\varphi_m)J_1(\varphi_m), \quad (2)$$

$$M^{(2)}(\varphi_m) = 4J_0(\varphi_m)J_2(\varphi_m)\left[\exp\left(-\frac{\Gamma_E}{2}d\right)\cos\left(\frac{\Gamma_f}{2}d\right) - 1\right] = 4M_{2m}J_0(\varphi_m)J_2(\varphi_m) \quad (3)$$

где $J_n(\varphi_m)$ — функция Бесселя n -го порядка и d — толщина кристалла, а параметры M_{1m} и M_{2m} определяются анизотропией кристалла и характеризуют эффективность фазовой демодуляции по первой и второй гармоникам частоты модуляции. Коэффициенты связи Γ_E и Γ_f описывают вклад в попутное взаимодействие волн с одинаковой циркулярной поляризацией, связанный соответственно с эффектом Поккельса и с обратным флексоэлектрическим эффектом. В рассматриваемом случае принималось, что они удовлетворяют неравенствам $\Gamma_E, \Gamma_f \ll 4\rho$, где ρ — удельное оптическое вращение кристалла. Эти коэффициенты связи не зависят от знака циркулярной поляризации взаимодействующих волн и при ориентации вектора фоторефрактивной решетки \vec{K} вдоль кристаллографического направления $[00\bar{1}]$ и определяются выражениями

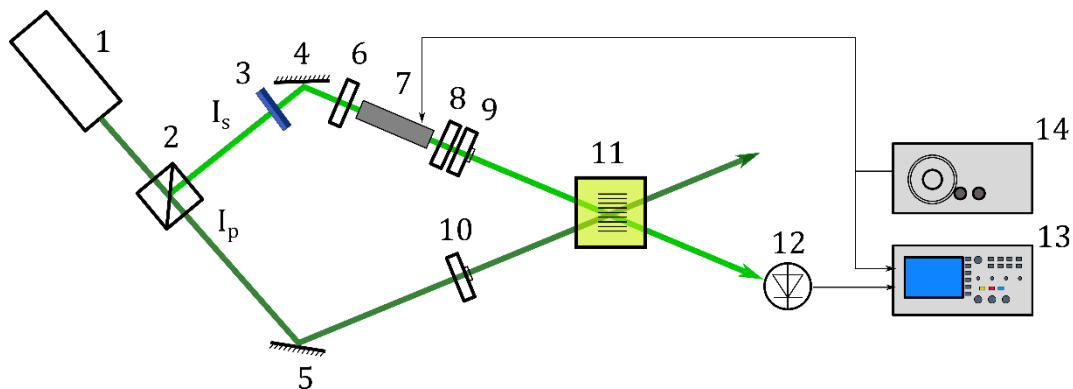
$$\Gamma_E = -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_0^3 r_{41}^S}{2} (1 + \sin^2 \theta) \cos \theta E_{SC}, \quad (4)$$

$$\Gamma_f = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \frac{2p_{11} + p_{12} + p_{13}}{4c_{11}} \left(\frac{2\pi}{\Lambda}\right) f_{1111} \cos^3 \theta E_{SC}, \quad (5)$$

где λ — длина волны света; n_0 — показатель преломления для невозмущенного кристалла; r_{41}^S — компонента электрооптического тензора механически зажатого кристалла; p_{11} , p_{12} и p_{13} — упругооптические коэффициенты кристалла; E_{SC} — эффективное поле пространственного заряда голограммы [1, 10]; c_{11} — компонента тензора модулей упругости кристалла в сокращенной форме записи и $\Lambda = 2\pi / |\vec{K}|$ — пространственный период фоторефрактивной голограммы. Угол в кристалле между волновыми векторами взаимодействующих световых волн считается здесь равным 2θ , а его биссектриса — направленной вдоль кристаллографической оси $[110]$. Отметим, что линейный электрооптический эффект в рассматриваемом случае попутного взаимодействия на фоторефрактивной голограмме диффузионного типа определяет амплитуду второй гармоники выходного сигнала, используемой для измерительных систем с квадратичным режимом фазовой демодуляции [2, 3]. Линейный режим, в котором проводится измерение амплитуды первой гармоники, определяется коэффициентом связи Γ_f , пропорциональным компоненте тензора флексоэлектрической связи исследуемого кристалла f_{1111} [10–12].

2. Эксперимент

В экспериментах использовался монокристаллический образец $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза (110) с просветленными гранями, имеющий толщину $d = 2,2$ мм и поперечные размеры 15×15 мм². Схема



1 – твердотельный лазер, 2 – оптический делитель, 3 – светофильтры, 4 и 5 – зеркала, 6 – призма Глана, 7 – фазовый электрооптический модулятор, 8 – дихроичный поляризатор, 9 и 10 – перестраиваемые четвертьволновые пластины, 11 – фоторефрактивный кристалл $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза (110), 12 – фотодиод, 13 – цифровой осциллограф, 14 – генератор низкочастотных сигналов

Рис. 1. Схема адаптивного голографического интерферометра, предназначенного для измерения материальных параметров кристаллов класса силленитов при попутном двухволновом взаимодействии

экспериментального макета адаптивного голографического интерферометра, используемого для измерения материальных параметров данного образца, представлена на рисунке 1.

В качестве источника излучения использовался одночастотный твердотельный лазер ($\lambda = 632,8$ нм, мощность 5 мВт). Делительный кубик 2 разделял лазерное излучение с вектором поляризации, ортогональной плоскости рисунка, на опорную I_p и сигнальную I_s волны; интенсивность сигнальной волны уменьшалась до уровня $I_s \approx I_p/60$ набором светофильтров 3. Призма Глана 6 корректировала поляризацию света на входе электрооптического модулятора МЛ-102А для обеспечения его работы в фазовом режиме, а поляризатор 8 в сочетании с четвертьволновой пластиной 9 позволял получить модулированную по фазе на частоте $\Omega/2\pi = 1200$ Гц сигнальную волну с правой или левой циркулярной поляризацией. Такая же четырехволновая пластина 10 использовалась для задания для стационарной опорной волны также правой или левой циркулярной поляризации соответственно. Угол между каждым из световых пучков и нормалью к входной грани образца в воздухе составлял 30° . Интерферируя между собой, сигнальная и опорная волны формировали в исследуемом кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза (110) стационарную фоторефрактивную голограмму, на которой осуществлялась фазовая демодуляция. После взаимодействия модулированная по интенсивности сигнальная волна попадает на фотоприемник 12 (фотодиод ВРW-34, сопротивление нагрузки 51 кОм, напряжение смещения 4,9 В). Сигнал фазовой демодуляции, в соответствии с соотношением (1) представляющий набор временных гармоник, поступал на открытый вход цифрового осциллографа Tektronix TDS-2012С. Специализированная компьютерная система обработки данных МОННЕНБЛУЕНЕН [16] позволяла в цифровом виде фиксировать в моменты времени t_i выборки сигнала фазовой демодуляции с длительностью около 2,5 мс, с интервалом в 1 с между ними, и далее аппроксимировать их разложением на гармоники с частотами $n\Omega$, с определением их амплитуд для n от 0 до 5.

Табл. 1. Параметры эффективности фазовой демодуляции при ориентации вектора фоторефрактивной решетки \vec{K} вдоль кристаллографического направления $[00\bar{1}]$

Параметр	Значение
M_{1m}^r	$(4,4 \pm 0,7) \cdot 10^{-5}$
M_{2m}^r	$(48,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-5}$
M_{1m}^l	$(1,1 \pm 0,9) \cdot 10^{-5}$
M_{2m}^l	$(55,0 \pm 2,3) \cdot 10^{-5}$

Образец $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ размещался в держателе, позволявшем поворачивать его на 360° вокруг горизонтальной оси, совпадающей с биссектрисой угла между записывающими голограмму световыми пучками и кристаллографическим направлением $[110]$. Это позволяло зарегистрировать ориентационную зависимость для параметра эффективности демодуляции по второй гармонике M_{2m} от угла θ_G между вектором решетки \vec{K} и осью $[001]$ кристалла. Локальные минимумы на этой зависимости $M_{2m}(\theta_G)$ соответствуют ориентации $\vec{K} \parallel [001]$ ($\theta_G = 0^\circ$) и $\vec{K} \parallel [00\bar{1}]$ ($\theta_G = 180^\circ$). Измеренные для последней ориентации образца параметры эффективности демодуляции для правой (M_{1m}^r, M_{2m}^r) и левой (M_{1m}^l, M_{2m}^l) циркулярной поляризации взаимодействующих волн представлены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что параметры эффективности фазовой демодуляции зависят от знака циркулярной поляризации; при этом наблюдаемые различия превосходят экспериментальные ошибки.

3. Обсуждение результатов

Как следует из сравнения приведенной выше теоретической модели для обоих параметров эффективности фазовой демодуляции с экспериментальными данными (табл. 1), для исследованного кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ существуют дополнительные физические механизмы возмущения его оптических свойств электрическим полем фоторефрактивной голограммы. Эти механизмы могут быть связаны как непосредственно с амплитудой этого поля, так и с его градиентом. Как известно [17], в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ может наблюдаться эффект электрогирации, заключающийся во влиянии электрического поля на удельную оптическую активность. Можно предположить, что градиент напряженности электрического поля также может возмущать удельное оптическое вращение ρ . Используя подход, описанный в [18], представим псевдотензор гирации кристалла g_{kl} в виде разложения

$$g_{kl} = g_0 \delta_{kl} + \gamma_{klm} E_m + \beta_{klmn} \frac{\partial E_m}{\partial x_n}, \quad (6)$$

в котором g_0 — тензор гирации в отсутствие поля, а тензор γ_{klm} описывает известный эффект электрогирации. Тензор четвертого ранга β_{klmn} , имеющий такую же симметрию, как тензор флексоэлектрической связи f_{klmn} , будем называть тензором флексогирации.

Анализ показывает, что с учетом эффектов электро- и флексогирации в выражениях (2) и (3) коэффициенты связи, описывающие взаимодействие волн с правой и левой циркулярными поляризациями в кристаллах класса силленитов среза (100) при ориентации вектора фоторефрактивной решетки $\vec{K} \parallel [00\bar{1}]$, должны быть представлены в виде

$$\Gamma_E^{r,l} = -\frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \left[\frac{r_{41}^S}{2} (1 + \sin^2 \theta) \mp \gamma_{41} \cos \theta \right] \cos \theta E_{SC}, \quad (7)$$

$$\Gamma_f^{r,l} = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \left[\frac{2p_{11} + p_{12} + p_{13}}{4c_{11}} f_{1111} \cos \theta \pm \frac{\beta_{1122} + \beta_{2211}}{2} \right] \frac{2\pi}{\Lambda} \cos^2 \theta E_{SC}. \quad (8)$$

Соотношения (2) и (3) и экспериментальные данные из табл. 1 позволяют найти следующие значения для коэффициентов связи: $\Gamma_E^r = -42,6 \text{ м}^{-1}$, $\Gamma_E^l = -48,7 \text{ м}^{-1}$, $\Gamma_f^r = 3,8 \text{ м}^{-1}$ и $\Gamma_f^l = 3,8 \text{ м}^{-1}$. Из них на основании формул (7) и (8), используя значения известных материальных констант кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ [1, 13], получаем следующие оценки его параметров, определяющих вклад в рассматриваемое попутное взаимодействие циркулярно-поляризованных волн: $f_{1111} = 21,6 \text{ нКл/м}$, $\gamma_{41} = -0,35 \text{ пВ/м}$ и $\beta_{1122} + \beta_{2211} = -5 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{В}$.

Заключение

Таким образом, результаты теоретического анализа и экспериментального исследования фазовой демодуляции при попутном взаимодействии волн с одинаковой циркулярной поляризацией в кристалле силиката висмута среза (110) показали возможность оценки его неизвестных материальных параметров, таких как коэффициент флексоэлектрической связи f_{1111} , электрогирационная постоянная γ_{41} и эффективный флексогирационный параметр $\beta_{1122} + \beta_{2211}$.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Госзадания на 2020–2022 годы (задание FEWM-2020-0038/3).

Список источников

- [1] **Петров, М. П.** Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М. П. Петров, С. И. Степанов, А. В. Хоменко. — СПб. : Наука, 1992. — 320 с.
- [2] **Колегов, А. А.** Адаптивная интерферометрия, использующая динамические отражательные голограммы в кубических фоторефрактивных кристаллах / А. А. Колегов, С. М. Шандаров, Г. В. Симонова, Л. А. Кабанова, Н. И. Буримов, С. С. Шмаков, В. И. Быков, Ю. Ф. Каргин // Квантовая электроника. — 2011. — Том 41. — №9. — С. 847–852.
- [3] **Кульчин, Ю. Н.** Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей / Ю. Н. Кульчин, О. Б. Витрик, А. А. Камшилин, Р. В. Ромашко. — М. : Наука, 1973. — 321 с.
- [4] **Ромашко, Р. В.** Шестиканальный адаптивный волоконно-оптический интерферометр / Р. В. Ромашко, М. Н. Безрук, А. А. Камшилин, Ю. Н. Кульчин // Квантовая электроника. — 2012. — Том 42. — №6. — С. 551–556.
- [5] **Stepanov, S.** Population gratings in rare-earth doped fibers for adaptive detection of laser induced ultra-sound / S. Stepanov, F. P. Cota, A. N. Quintero, P. R. Montero // Journal of Holography and Speckle. — 2009. — Vol. 5. — №3. — P. 303–309.

- [6] **Hall, T. J.** Detector for an optical-fiber acoustic sensor using dynamic holographic interferometry / T. J. Hall, M. S. Ner, M. A. Fiddy // Optics Letters. — 1980. — Vol. 5. — № 11. — P. 485–487.
- [7] **Stepanov, S. I.** Applications of photorefractive crystals / S. I. Stepanov // Reports on Progress in Physics. — 1994. — Vol. 39. — P. 39–116.
- [8] **Solymar, L.** The physics and application of photorefractive materials / L. Solymar, D. J. Webb, A. Grunnet-Jepsen. — Oxford : Clarendon Press, 1996. — 496 p.
- [9] **Kamshilin, A. A.** Adaptive interferometry with photorefractive crystals / A. A. Kamshilin, R. V. Romashko, Yu. N. Kulchin // Journal of Applied Physics. — 2009. — Vol. 105. — № 3. — P. 031101.
- [10] **Шандаров, С. М.** Обнаружение вклада обратного флексоэлектрического эффекта в фоторефрактивный отклик в монокристалле титаната висмута / С. М. Шандаров, С. С. Шмаков, Н. И. Буримов, О. С. Сюваева, Ю. Ф. Каргин, В. М. Петров // Письма в ЖЭТФ. — 2012. — Том 95. — № 12. — С. 699–702.
- [11] **Шандаров, С. М.** Вклад обратного флексоэлектрического эффекта во встречное двухволновое взаимодействие световых пучков в фоторефрактивных кристаллах / С. М. Шандаров, С. С. Шмаков, П. В. Зуев, Н. И. Буримов, Ю. Ф. Каргин, В. В. Шепелевич, П. И. Ропот, В. Г. Гуделев // Оптический журнал. — 2013. — Том 80. — № 7. — С. 5–12.
- [12] **Шмаков, С. С.** Вклад обратного флексоэлектрического эффекта в фоторефрактивный отклик в титанате висмута / С. М. Шандаров, Н. И. Буримов, С. С. Шмаков, П. В. Зуев, А. Е. Урбан, В. С. Горбачев, Ю. Ф. Каргин, В. В. Шепелевич // Известия РАН. Серия физическая. — 2012. — Том 76. — № 12. — С. 1452–1455.
- [13] **Степанов, С.И.** Фотоупругий вклад в фоторефрактивный эффект в кубических кристаллах / С. И. Степанов, С. М. Шандаров, Н. Д. Хатьков // ФТТ. — 1987. — Том 29. — № 10. — С. 3054–3058.
- [14] **Шандаров, С. М.** Применение адаптивной голографической интерферометрии для определения параметров фоторефрактивных кристаллов / С. М. Шандаров, Н. И. Буримов, В. И. Быков, В. В. Шепелевич // Голография. Наука и практика : Сборник трудов. — 2015. — С. 219–222.
- [15] **Shandarov, S. M.** Two-wave mixing on reflection dynamic gratings in sillenite crystals under phase modulation of signal beam / S. M. Shandarov, A. A. Kolegov, N. I. Burimov, V. I. Bykov, V. M. Petrov, Yu. F. Kargin // Physics of Wave Phenomena. — 2009. — Vol. 17. — № 1. — P. 39–44.
- [16] **Свидетельство № RU 2018611 588.** Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / А. О. Злобин, С. М. Шандаров, А. А. Шмидт. — Опубл. 02.02.2018.
- [17] **Куцаенко, В. В.** Электрогирационный эффект в силикате висмута / В. В. Куцаенко, В. Т. Потапов // Письма в ЖЭТФ. — 1986. — Том 43. — № 2. — С. 108–110.
- [18] **Влох, О. Г.** Явления пространственной дисперсии в параметрической кристаллооптике / О. Г. Влох. — Львов : Вища шк. Изд-во при Львов, ун-те, 1984. — 156 с.