

05;07;08

Оптическое возбуждение поверхностных волн и фотопьезоэлектрический резонанс в фоторефрактивном кристалле

© М.П. Петров, А.П. Паугурт, В.В. Брыксин, В.М. Петров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 15 июня 1998 г.

Впервые обнаружено резонансно-оптическое возбуждение колебаний поверхности фоторефрактивного кристалла (BSO) при записи голограммы осциллирующей интерференционной картиной. Обнаруженные колебания рельефа поверхности обусловлены осцилляцией поля пространственного заряда и обратным пьезоэффектом.

Фоторефрактивные кристаллы обладают как электрооптическим, так и пьезоэлектрическим эффектами. Поэтому при голографической записи в этих средах, когда формируется решетка электрического поля, возникают не только вариации показателя преломления, но и деформации в образце. В результате при соответствующей геометрии среза кристалла появляется периодический рельеф поверхности, который можно рассматривать как отражательную голограмму, поскольку смещения поверхности в линейном приближении должны быть линейным образом связаны с интерференционной картиной света, падающего на кристалл. Экспериментально в фоторефрактивном кристалле такая голограмма впервые наблюдалась в статических условиях в $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ [1], теоретический анализ рельефа поверхности для одноосных кристаллов был сделан в [2,3], в [4] для регистрации дифракции света на такой голограмме в $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ была впервые использована методика двухволнового взаимодействия при записи двумя когерентными лучами, один из которых периодически модулируется по фазе.

В настоящей работе также проводилась запись голограммы, когда один из лучей модулировался по фазе, однако кроме регистрации двухволнового взаимодействия, где участвует "минус" первый порядок дифракции, мы наблюдали также первый порядок дифракции, который является фазовообращенным (или фазовосопряженным) по отношению

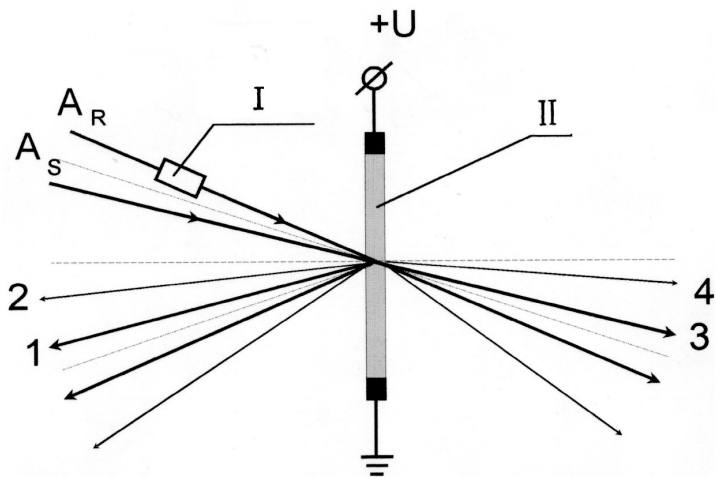


Рис. 1. Геометрия эксперимента: *I* — электрооптический модулятор, *II* — кристалл $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$.

к соответствующему записывающему лучу. Регистрация фазовообращенной волны дает возможность непосредственно регистрировать частотную зависимость колебаний поверхности кристалла и делать вывод о наличии колебаний поверхности, в том числе фотопьезоэлектрического резонанса.

На рис. 1 изображена схема эксперимента. Запись голографических решеток осуществлялась с помощью лучей A_S и A_R , причем фаза луча A_R модулировалась с помощью электрооптического модулятора. В качестве источника света использовался лазер Compass-200, $\lambda = 530 \text{ nm}$, выходная мощность 200 mW. Измерения проводились на кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, срез (110), электрическое поле E_0 прикладывалось вдоль оси [001]. Передняя и задняя грани кристалла не были параллельны, что давало возможность однозначно разделить лучи, отраженные от передней и задней граней.

Если фотоприемник помещался в (•)1, то регистрировался сигнал двухволнового взаимодействия (отраженный луч A_S плюс дифракция "минус" первого порядка луча A_R). Если же фотоприемник находился в (•)2, то регистрировался "плюс" первый порядок дифракции для отра-

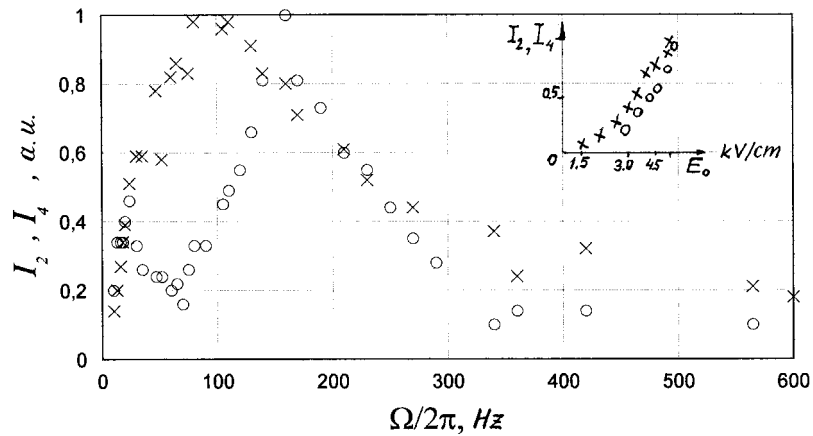


Рис. 2. Зависимость I_2 и I_4 от частоты фазовой модуляции. $\theta \approx 0.8 \text{ rad}$, $m \approx 0.5$. Интенсивность падающего на кристалл света примерно 400 mW/cm^2 , $\Lambda = 27 \mu\text{m}$. На вставке показана зависимость I_2 и I_4 от внешнего поля на частотах, соответствующих резонансу. Все данные приведены в относительных единицах, абсолютные значения I_2 приблизительно на два порядка меньше, чем I_4 . I_2 — \circ , I_4 — \times .

женного луча. Заметим, что комплексная амплитуда луча, продифрагированного в $(\bullet)2$, $A_{S2} = \sqrt{\eta} A_S^*$, где $\sqrt{\eta}$ — дифракционная эффективность, т. е. A_{S2} является фазообращенным лучом по отношению к A_S .

Для позиции фотоприемника $(\bullet)3$ или $(\bullet)4$ регистрировался соответственно сигнал двухволнового взаимодействия и обращенный луч, но в геометрии "на прохождение", т. е. за счет дифракции на решетке показателя преломления. Рис. 2 показывает зависимости выходных сигналов от частоты модуляции $\Omega/2\pi$ для обращенных лучей в геометрии "на прохождение" I_4 , и в геометрии "на отражение" I_2 . Зависимость тех же сигналов от внешнего поля E_0 имеет кубический характер.

Для количественного теоретического анализа необходимо рассмотреть совместно так называемые уравнения Кухтарева [5], описывающие формирование решетки электрического заряда и поля в фоторефрактивном кристалле и уравнения эластодинамики [6] с учетом вклада пьезоэффекта. В данной работе мы ограничимся лишь качественной интерпретацией результатов.

Известно [7], что амплитуда решетки электрического поля при дрейфовом механизме записи голограммы с участием фазово-модулированного луча, а также при условии малого контраста интерференционной картины m и малой амплитуды фазовой модуляции θ имеет вид:

$$E_{SC}(t) = -mE_0(1 + F' + iF''), \quad (1)$$

$$F' = \frac{\theta g d \cos(\Omega t + \gamma)}{\sqrt{1 + 2g^2(1 - d^2) + g^4(1 + d^2)^2}}, \quad (2)$$

$d = KL_0$, $K = 2\pi/\Lambda$, где Λ — период интерференционной картины, L_0 — дрейфовая длина носителей ($L_0 \propto E_0$); γ — фаза, зависящая от Ω ; $g = \Omega\tau_M$, τ_M — максвелловское время релаксации; выражение для F'' приведено в [7]. Можно найти, что с точностью до членов порядка θ^2 :

$$I_4 = I_S \Phi(r_{ij}) m^2 E_0^2 F', \quad (3)$$

где $\Phi(r_{ij})$ — коэффициент, зависящий от электрооптического тензора r_{ij} ; I_S — интенсивность S луча. В то же время можно предположить, что поскольку деформации поверхности линейно связаны с электрическим полем решетки $E_{SC}(t)$, то

$$I_2 = I_S R_0^2 m^2 E_0^2 \left| (D(0) + D(\Omega)F' + iD(\Omega)F'') \right|^2. \quad (4)$$

Здесь R_0 — коэффициент отражения по амплитуде, $D(0)$ и $D(\Omega)$ — коэффициенты, зависящие от пьезоэлектрической константы, упругих констант, периода решетки Λ для нулевой частоты и Ω соответственно. В общем случае $D(\Omega)$ может быть комплексной величиной. Тогда с точностью до членов порядка θ^2 :

$$I_2 = I_S R_0^2 m E_0^2 D(0) (\operatorname{Re} D(\Omega) F' - \operatorname{Im} D(\Omega) F''). \quad (5)$$

Здесь Re и Im означают вещественную и мнимую части $D(\Omega)$ соответственно.

Из [7] известно, что F' имеет максимум на частоте $\Omega = \Omega_r = 1/\tau_M(d^2 + 1)^{1/2}$ (при $m \ll 1$). F'' имеет максимум при $\Omega = 0$, если $d \ll 1$, и при $\Omega = \Omega_r$, если $d \gg 1$.

Сопоставление экспериментальных зависимостей I_2 и I_4 позволяет сделать вывод о том, что максимумы в области частот 90 и 160 Hz связаны с максимумом функции F' (и, возможно, F'' для I_2).

Качественно механизм возникновения обнаруженных максимумов объясняется следующим образом.

Когда фоторефрактивный кристалл освещается двумя лучами, один из которых промодулирован по фазе, то интерференционная картина осциллирует вблизи своего равновесного положения с частотой Ω . Эти колебания интерференционной картины вызывают соответствующие осцилляции решетки объемного заряда. Если частота Ω находится вблизи собственной частоты волн объемного заряда Ω_r [7,8], то возникает усиление волн объемного заряда, а следовательно, волн решетки электрического поля и фоторефрактивных волн, что и регистрируется с помощью луча I_4 . Поскольку имеется резонансное усиление поля $E_{SC}(t)$, то имеет место и максимум амплитуды колебаний поверхности за счет обратного пьезоэлектрического эффекта. Поэтому должен появляться максимум для I_2 на той же частоте, что и для I_4 . Этот механизм описывает также кубическую зависимость I_2 и I_4 от внешнего поля. Однако экспериментально максимум I_2 сдвинут по отношению к максимуму I_4 на 70 Hz. Это может быть связано как с частотной зависимостью $D(\Omega)$, так и с различной величиной τ_M вблизи поверхности и в глубине кристалла, поскольку τ_M зависит (обратно пропорционально) от интенсивности записывающего света, а эта интенсивность существенно неоднородна по толщине кристалла из-за поглощения. В некоторых экспериментах мы наблюдали дополнительный максимум для луча I_2 на частотах вблизи 500–600 Hz, что может быть связано с собственными колебаниями поверхностного слоя образца. Обнаруженные резонансные максимумы для отраженного луча I_2 могут быть названы фотопьезоэлектрическим резонансом, так как они возникают в результате резонансного оптического возбуждения поверхностных волн в кристалле за счет пьезоэффекта.

Список литературы

- [1] Близнецов А.М., Петров М.П., Хоменко А.В. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. С. 1094.
- [2] Шандаров С.М. // ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 583.
- [3] Шандаров С.М., Шандаров В.М. // ЖТФ. 1990. Т. 60. С. 106.
- [4] Stepanov S., Korneev N., Gerwens A., Buse K. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. P. 879.
- [5] Kukhtarev N.M., Markov V.B., Odulov S.G., Soskin M.S., Vinetsky V.L. // Ferroelectrics. 1979. V. 22. P. 949.

- [6] *Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П.* Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1979.
- [7] *Petrov M.P., Petrov V.M., Bryksin V.V., Zouboulis I., Gerwens A., Kraetzig E.* // Opt. Lett. 1997. V. 22. P. 1083.
- [8] *Казаринов Р.Ф., Сурис Р.А., Фукс Б.И.* // ФТП. 1972. Т. 6. С. 572.