

УДК 535.4

Ф.И. ФЁДОРОВ И РАЗВИТИЕ ОПТИКИ ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛОВ

В.В. Шепелевич

Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина, Мозырь

F.I. FEDOROV AND DEVELOPMENT OF THE OPTICS OF PHOTOREFRACTIVE CRYSTALS

V.V. Shepelevich

I.P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University, Mozyr

Рассмотрено влияние трудов Ф.И. Фёдорова и его научной школы на прогресс в оптике фоторефрактивных кристаллов. Показано, что созданные Ф.И. Фёдоровым ковариантные методы способствовали разработке строгой теории фоторефрактивного эффекта в кристаллах. Особое внимание уделено развитию в Беларуси голографии на базе фоторефрактивных кристаллов.

Ключевые слова: пьезоэлектрический эффект, фотоупругость, пьезокристалл, гиротропия, дифракционная эффективность.

The influence of works of F.I. Fedorov and his scientific school on the progress in the optics of photorefractive crystals is considered. It is shown that the covariant methods created by F.I. Fedorov promoted the elaboration of the strict theory of the photorefractive effect in crystals. Special attention is given to the development of holography on the base of photorefractive crystals in Belarus.

Keywords: piezoelectric effect, photoelasticity, piezocrystal, gyrotropy, diffraction efficiency.

Академика Ф.И. Фёдорова можно без сомнений назвать отцом теоретической физики в Беларуси. Созданная Ф.И. Фёдоровым научная школа и сегодня оказывает заметное влияние на развитие науки в нашей стране, а разработанные им ковариантные методы расчетов позволяют изящно решать сложные проблемы в различных областях физики. Написанные Ф.И. Фёдоровым монографии [1]–[4] являются настольными книгами каждого физика-теоретика в Беларуси, весьма популярны они и у зарубежных учёных.

В настоящем обзоре раскрывается влияние Ф.И. Фёдорова и его школы на одну из ветвей современной физики – оптику фоторефрактивных кристаллов.

Фоторефрактивный эффект, состоящий в изменении тензора диэлектрической проницаемости кристалла под действием света, был открыт в 1966 году [5]. Наиболее чувствительными к свету оказались кристаллы типа силленита, в частности кристалл кубической сингонии $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO), проявляющий значительную оптическую активность (естественную гиротропию [3]). На первой стадии изучения фоторефрактивного эффекта в таких кристаллах предполагалось, что только электрооптический эффект определяет механизм изменения тензора диэлектрической проницаемости под действием переменного в пространстве электрического поля заряда, создаваемого светом. Под влиянием электрического поля пространственного заряда,

как известно [6], кубический кристалл в общем случае становится двуосным. В связи со сложностью расчетов при вычислении энергетических и поляризационных характеристик света, дифрагированного на голограммах, записанных в фоторефрактивных кристаллах, гиротропией этих кристаллов пренебрегали или учитывали её только в некоторых частных случаях.

Приблизительно в это же время, благодаря применению ковариантных методов Ф.И. Фёдорова, был достигнут значительный прогресс в развитии оптики анизотропных сред и теории гиротропии. Ф.И. Фёдоровым и его учениками Б.В. Бокутем и А.Н. Сердюковым были развиты основы электродинамики гиротропных сред [3], [7]. Ковариантные методы Ф.И. Фёдорова были плодотворно использованы для описания оптических свойств кристаллов в монографии [8], значительная часть которой посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям гиротропных кристаллов и параметрической кристаллооптике.

Автор настоящего сообщения имел возможность изучить ковариантные методы, их применение в оптике и теорию гиротропии: под руководством Б.В. Бокутя и А.Н. Сердюкова он выполнил диссертационное исследование и защитил кандидатскую диссертацию. Поэтому было естественным применить знания по теории гиротропии и ковариантным методам в области голографии, и в [9] было изучено влияние

гиротропии регистрирующей среды на дифракционную эффективность голограмм. В 1986 г. опубликована работа [10], в которой в рамках электрооптического механизма фоторефракции с использованием ковариантных методов, описанных в частности в статье Л.М. Барковского и Ф.И. Фёдорова [6], были рассчитаны выходные характеристики голографической решетки, записанной в оптически активном кубическом кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) среза (110). В [10] принято, что вектор голографической решетки ориентирован вдоль направления [001]. В таких условиях пьезоэлектрический эффект в кубических кристаллах не проявляется, поэтому результаты теоретических расчётов практически совпадали с экспериментальными данными, приведенными в [11].

Однако постепенно стало понятным, что учёта только электрооптического механизма фоторефрактивного эффекта недостаточно для описания всего комплекса экспериментов, проводимых с фоторефрактивными кристаллами.

В 1982 году в работе томских физиков [12] высказана идея о дополнительном механизме фоторефракции – предполагалось, что электрическое поле пространственного заряда \mathbf{E} опосредованно, через обратный пьезоэлектрический эффект, индуцирует в кристалле деформации, и вследствие фотоупругого эффекта имеет место дополнительное изменение ΔB обратного тензора диэлектрической проницаемости кристалла. Влияние электрического поля пространственного заряда на тензор обратной диэлектрической проницаемости можно учесть, представляя ΔB в следующей ковариантной форме [12]:

$$\Delta B = r^S \cdot \mathbf{E} + p^E : \mathbf{n} \gamma \cdot (\mathbf{E} \cdot \mathbf{e} \cdot \mathbf{n}) = r^{\text{эфф}} \cdot \mathbf{E}, \quad (1)$$

где r^S – тензор электрооптических постоянных механически зажатого кристалла; p^E – тензор фотоупругих постоянных, определённый при условии постоянного электрического поля; \mathbf{e} – тензор пьезоэлектрических постоянных; γ – тензор, обратный тензору $\Gamma^E = \mathbf{n} \cdot \mathbf{c}^E \cdot \mathbf{n}$; \mathbf{c}^E – тензор коэффициентов упругости кристалла [13], единичный вектор \mathbf{n} определяется в соответствии с равенством $\mathbf{n} = \frac{\mathbf{E}}{|\mathbf{E}|}$, $r^{\text{эфф}}$ – эффективный тензор, в

котором учтены как электрооптический, так и пьезоэлектрический механизмы фоторефракции; точка означает свёртку по двум соседним индексам [2], двоеточие – свёртку по двум парам соседних индексов [13]. Первое слагаемое в (1) – это изменение обратного тензора диэлектрической проницаемости ΔB , обусловленное электрооптическим эффектом. Второе слагаемое является следствием учёта дополнительного изменения тензора ΔB , индуцированного обратным пьезоэлектрическим эффектом и фотоупругостью.

Применение матричного метода [9], [10] решения уравнений связанных волн для гиротропных сред с использованием выражения (1) позволило впервые непротиворечиво описать свойства голографических решеток, записанных в кубических фоторефрактивных пьезокристаллах силленитов. Результаты теоретических и экспериментальных исследований свойств голограмм, зарегистрированных в кристалле BSO, полученные совместно с томской научной группой, были опубликованы в работах [14, 15].

После Международной конференции по фоторефракции в Асуа (Франция, 1990), на которой были представлены полученные результаты, новое направление в теории фоторефракции, заложенное в работе [12] и примененное к гиротропным средам в [14], [15], было признано всеми научными школами, исследующими фоторефрактивные материалы

Таким образом, в результате развития ковариантных методов Ф.И. Фёдорова применительно к голографии и использования непротиворечивой теории гиротропии [3], [7] для изучения оптически активных фоторефрактивных кристаллов, было основано новое научное направление в голографии фоторефрактивных кристаллов. В рамках этого направления пьезоэлектрический механизм фоторефракции в гиротропных кристаллах исследуется в целях адекватного описания экспериментальных данных и улучшения выходных энергетических характеристик голограмм.

Среди более поздних публикаций по рассматриваемой проблеме следует отметить работы [16] и [17]. В [16] на основе развитого в [14], [15] подхода объяснены результаты экспериментов по двухволновому смешению световых импульсов в фоторефрактивных кристаллах. В [17] получены явные выражения изменения компонент обратного тензора диэлектрической проницаемости ΔB_{ij} для кубических кристаллов произвольного среза. Отметим, что такие же выражения приведены под номером (6.78) и использованы для вычислений в известной монографии [18].

Насколько нам известно, впервые зависимость энергетических характеристик голограмм, записанных в кубических оптически активных пьезокристаллах, от толщины слоя была исследована в 1993 году в [19]. В этой статье проведен анализ зависимости максимальной относительной интенсивности предметной волны на выходе из кристалла BSO от ориентационного угла и толщины кристалла при двухволновом взаимодействии. Аналогичное исследование для кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ выполнено в [20] в 1997 году.

В работе [21] углублено теоретическое исследование зависимости максимальной дифракционной эффективности и ориентационного угла

в кристалле BSO среза $(\bar{1}\bar{1}0)$ от толщины кристалла; выявлено, при каких условиях посредством специального выбора азимута поляризации считывающей волны достижима максимальная дифракционная эффективность.

Возможность оптимизации эффективности двухволнового взаимодействия в кубических фоторефрактивных оптически активных кубических пьезокристаллах среза (110) оценивалась в статье [22].

Впервые влияние пьезоэлектрического эффекта и фотоупругости на свойства пропускающих голограмм, записанных в кубических фоторефрактивных кристаллах среза (111), было изучено теоретически и экспериментально в [23], [24].

Дальнейшие исследования мозырской научной группы по оптике фоторефрактивных сред были связаны с изучением свойств отражательных голограмм (см., напр. [25]–[29]), записанных в таких средах, а также с распространением и взаимодействием световых пучков в фоторефрактивных кристаллах (напр. [30]–[34]). В настоящее время исследование процессов записи и считывания информации в фоторефрактивных средах и разработка чувствительных оптических устройств на основе выявленных эффектов и закономерностей продолжают.

Данная работа посвящается светлой памяти академика Ф.И. Фёдорова (19.06.1911 – 13.10.1994), столетие со дня рождения которого отмечается в нашей стране и за рубежом.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь (Государственная комплексная программа научных исследований «Фотоника 1.07»), а также Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф10-202).

Автор благодарен А.Н. Годлевской за полезное обсуждение работы и конструктивные замечания, учёт которых позволил улучшить научный стиль этой статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фёдоров, Ф.И. Теория упругих волн в кристаллах / Ф.И. Фёдоров. – М. : Наука, 1965. – 386 с.
2. Фёдоров, Ф.И. Оптика анизотропных сред / Ф.И. Фёдоров. – Минск : Изд. АН БССР, 1958. – 380 с.
3. Фёдоров, Ф.И. Теория гиротропии / Ф.И. Фёдоров. – Минск : Наука и техника, 1976. – 456 с.
4. Фёдоров, Ф.И. Группа Лоренца / Ф.И. Фёдоров. – М. : Наука, 1979. – 384 с.
5. *Optically-induced refractive index inhomogeneities in LiNbO₃ and LiTaO₃* / A. Ashkin [et al.] // Appl. Phys Lett. – 1966. – Vol. 9, № 1. – P. 72–74.
6. Барковский, Л.М. Ковариантная форма электрооптического тензора в кристаллах высшей и средних сингоний при векторном взаимодействии / Л.М. Барковский, Ф.И. Фёдоров // Кристаллография. – 1965. – Т. 10, № 2. – С. 174–180.
7. Бокуть, Б.В. Основы теоретической кристаллооптики. Ч. 2. / Б.В. Бокуть, А.Н. Сердюков. – Гомель: ГГУ, 1977. – 70 с.
8. *Оптические свойства кристаллов* / А.Ф. Константинова [и др.]. – Минск : Навука і тэхніка, 1995. – 302 с.
9. Шепелевич, В.В. Дифракция света на объёмных голографических решётках, считываемых при включённой гиротропии / В.В. Шепелевич // ЖТФ. – 1985. – Т. 55, № 6. – С. 1201–1203.
10. Шепелевич, В.В. Влияние оптической активности на дифракционную эффективность голограмм и поляризацию дифрагированного света в фоторефрактивных кубических кристаллах / В.В. Шепелевич // ЖТФ. – 1986. – Т. 56, № 3. – С. 618–619.
11. Petrov, M.P. Light diffraction from volume phase holograms in electrooptic photorefractive crystals / M. P. Petrov, T. G. Pencheva, S. I. Stepanov // J. Optics. – 1981. – Vol. 12, № 15 – P. 287–292.
12. Влияние пьезоэффекта на процессы записи и восстановления голограмм в фоторефрактивных кристаллах / А.А. Изванов [и др.] // Автометрия. – 1982. – № 2. – С. 79–84.
13. Сиротин, Ю.И. Основы кристаллофизики / Ю.И. Сиротин, М.П. Шаскольская. – М. : Наука, 1975. – 680 с.
14. Мандель, А.Е. Влияние пьезоэлектрического эффекта и гиротропии на дифракцию света в кубических фоторефрактивных кристаллах / А.Е. Мандель, С.М. Шандаров, В.В. Шепелевич // Опт. и спектр. – 1989. – Т. 67, № 4. – С. 819–822.
15. Shepelevich, V.V. Light diffraction by holographic gratings in optically active photorefractive piezocrystals / V.V. Shepelevich, S.M. Shandarov, A.E. Mandel // Ferroelectrics. – 1990. – V. 110. – P. 235–249.
16. Влияние фотоупругости на самодифракцию света в электрооптических кристаллах / В.И. Волков [и др.] // Квантовая электроника. – 1991. – Т. 18, № 10. – С. 1237–1240.
17. Шандаров, С.М. Изменение тензора диэлектрической проницаемости в кубических фоторефрактивных кристаллах под действием электрического поля голографической решетки / С.М. Шандаров, В.В. Шепелевич, Н.Д. Хатьков // Опт. и спектр. – 1991. – Т. 70, № 5. – С. 1068–1073.
18. Solyman, L. The physics and applications of photorefractive materials / L. Solyman, D.J. Webb, A. Grunnet-Jepsen, Oxford: Clarendon Press, 1996. – P. 226–230.

19. *Shepelevich, V.V.* Optimization of the energy transfer in cubic photorefractive piezocrystals / V.V. Shepelevich // Topical meeting on photorefractive materials, effects, and devices PRM' 93/. Technical digest. – Kiev (Ukraine), Inst. Phys., 1993. – P. 128–131.
20. *Optimization of energy exchange of light waves in crystal BTO by selection of grating vector orientation and thickness of crystal* / V.V. Shepelevich [et al.] // Proceedings of Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects and Devices (PR'97), June 11 – 13, 1997, Chiba, Japan. – P. 594–596.
21. *Шепелевич, В.В.* Оптимизация выходных характеристик голограмм в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ выбором ориентации кристалла и поляризации считывающего света / В.В. Шепелевич, П.П. Хомутовский // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 24, № 24. – С. 55–60.
22. *Optimization of two-wave interaction efficiency in cubic photorefractive sillenite-type crystals with optical rotary power and piezoeffect in diffusion regime* / V.V. Shepelevich [et al.] // Ferroelectrics. – 1999. – Vol. 75. – P. 289–309.
23. *Optimization at two-wave mixing in cubic photorefractive piezocrystals of (111)-cut* / V.V. Shepelevich [et al.] // OSA Trends in Optics and Photonics. – 1999. – Vol. 27. – P. 353 – 358.
24. *Optimization of diffraction efficiency and gain for two-wave mixing in cubic (111)-cut photorefractive piezocrystals* / V.V. Shepelevich [et al.] // Ferroelectrics. – 2002. – Vol. 266. – P. 305–333.
25. *Дифракция световых волн на отражательных голограммах в кубических пьезокристаллах* / В.В. Шепелевич [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 29, № 18. – С. 22–28.
26. *Навныко, В.Н.* Дифракционная эффективность отражательных голограмм в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ произвольного среза / В.Н. Навныко, В.В. Шепелевич // Веснік Мазырскага дзяржаўнага педагагічнага ўніверсітэта. – 2006. – № 1. – С. 21–25.
27. *Навныко, В.Н.* Процессы энергетического переноса при двухволновом взаимодействии на отражательных решетках в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ произвольного среза / В.Н. Навныко, В.В. Шепелевич // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2006. – Т. 6. – Ч. 2. – С. 143–146.
28. *Навныко, В.Н.* Встречное двухволновое взаимодействие на отражательных голограммах в кубических фоторефрактивных пьезокристаллах произвольного среза / В.Н. Навныко, В.В. Шепелевич // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33, вып. 17. – С. 16–23.
29. *Shepelevich, V.V.* Effect of optical activity and crystal symmetry on maximal diffraction efficiency of reflection holograms in cubic photorefractive piezocrystals / V.V. Shepelevich, V.N. Navnyka // Appl. Phys. – 2009. – В95. – P. 459–466.
30. Взаимодействие экранирующих солитонов в кубических оптически активных фоторефрактивных кристаллах / В.В. Шепелевич [и др.] // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 4. – С. 351–355.
31. *Влияние оптической активности на распространение двумерных пространственных солитонов в кубических фоторефрактивных кристаллах* / В.В. Шепелевич [и др.] // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37, № 4. – С. 353–357.
32. *Incoherent interaction of Gaussian beams in photorefractive optically active crystals* / V.V. Shepelevich [et al.] // Appl. Phys. B. – 2008. – Vol. 90. – P. 149–153.
33. *D. Interaction of two-dimensional rectangular light beams in a photorefractive SBN crystal* / D. Khmel'nitsky [et al.] // Ferroelectrics. – 2009. – Vol. 390. – P. 116–127.
34. *Взаимодействие двумерных ортогонально поляризованных супергауссовых световых пучков в фоторефрактивном кристалле* / В.В. Давыдовская [и др.] // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40, № 10. – С. 899–906.

Поступила в редакцию 08.06.11.