

ФИЗИКА

УДК 535.5

Оптические свойства гиротропных слоисто-периодических сред

И. В. СЕМЧЕНКО, С. А. ХАХОМОВ

В 1973 году академиком Бокутем Б.В. положено начало созданию в ГГУ имени Ф. Скорины крупной научной школы в области оптики и акустики анизотропных и гиротропных сред.

Многослойные композитные материалы уже более 30 лет вызывают интерес у исследователей, занимающихся электромагнитными свойствами материалов [1–11].

Ведущая идея исследований основывается на особенности слоистых и композитных структур не только сочетать полезные свойства своих компонент, но и допускать существование явлений, принципиально невозможных в образующих ее материалах, взятых по отдельности.

В работах [1–3] показано, что в тонкопленочном пределе магнитооптический эффект Керра подчиняется закону аддитивности для системы, состоящей из любого числа магнитных пленок. Предположение проверено экспериментально и путем численного расчета на примере 3-х слойной структуры Fe/Cu/Fe, выращенной на Pb-подложке.

С помощью модели сверхрешеток выведена элементарная формула для магнитооптического эффекта Керра. Особенности взаимодействия света с периодической бигиротропной средой исследуются в работе [4]. Получены коэффициенты отражения и прохождения, эллиптичность и угол поворота плоскости поляризации световой волны на резонансных и нерезонансных частотах. Для описания распространения электромагнитных волн в бианизотропных киральных слоистых структурах в статье [5] предложено использовать метод матрицы 4×4. В работе исследованы зависимости амплитудных и поляризационных характеристик отраженных и прошедших волн от угла падения. В статье [6] рассматривается отражение и прохождение света в периодических анизотропных структурах, содержащих слои, которые взаимодействуют в когерентном и некогерентном режимах с прошедшей волной. В работе [7] получены формулы интенсивности и поляризации отраженного и прошедшего света для случая трехслойной системы. Система состоит из ферромагнитной пленки и граничащих с ней немагнитных слоев. Приняты во внимание эффекты интерференции и затухания света. В статье [8] выражены коэффициенты Френеля для волны, падающей на полубесконечный композит. В работах [9–11] изучены свойства слоистого ферромагнитного изолятора на границе материала в микроволновом устройстве, находящемся в статическом магнитном поле.

Однако в указанных работах не произведено подробное рассмотрение оптических свойств слоисто-периодических структур, селективных по частоте и поляризации. Такая селективность оптических свойств является наиболее ярко выраженной, если в гиротропном слое наблюдается резонансное отражение одной из собственных световых волн, имеющих циркулярную поляризацию.

Создание материалов с новыми оптическими свойствами может быть осуществлено путем комбинации кристаллов, обладающих необходимыми характеристиками. Современные методы позволяют создавать такие слоисто-периодические системы (сверхрешетки) с периодом в пределах от 10 до 1000 ангстрем [12]. В связи с этим процессы, происходящие в сверхрешетках, наиболее просто могут быть описаны в длинноволновом приближении, учи-

тывающем, что длины электромагнитных либо звуковых волн велики по сравнению с периодом структуры. В этом случае сверхрешетку можно рассматривать как однородную среду, характеризующую набором эффективных параметров. Таким образом, сверхрешетки сочетают в себе полезные свойства своих компонент, то есть тех кристаллов, из которых они образованы. Кроме того, в сверхрешетках возможно сильное изменение показателя преломления света под действием внешнего электрического поля [13, 14]. Еще одним важным свойством сверхрешеток является несовпадение их кристаллографической симметрии с симметрией кристаллов, используемых в качестве слоев. Например, если слои являются изотропными, сверхрешетка в целом представляет собой одноосный кристалл [15, 16]. Благодаря такому изменению симметрии в сверхрешетках возможны интересные эффекты, например, акустооптические [17–19]. В 80-е годы прошлого века были определены эффективные упругие модули сверхрешеток при произвольной кристаллографической симметрии слоев [12, 20], а также упругооптические [12, 18], пьезоэлектрические [21, 22], электрооптические [23] и нелинейнооптические [24, 25] коэффициенты сверхрешеток. В Гомельском госуниверситете им. Ф. Скорины были исследованы гиротропные свойства сверхрешеток и вычислены компоненты эффективного тензора гиротропии [26, 27].

Среди гиротропных кристаллов особое место занимают магнитоупорядоченные кристаллы, на оптические свойства которых оказывает влияние не только молекулярная гиротропия, но и эффект Фарадея, вызванный внутренним магнитным полем. Исследованию собственных волн электромагнитного поля в таких кристаллах посвящены статьи Б. В. Бокутя и С. С. Гиргеля [28, 28]. В работе [30] показано, что в некоторых особых направлениях в магнитоупорядоченных гиротропных кристаллах наряду с обычной однородной эллиптически поляризованной волной может возникать и другая волна типа Фойгта, амплитуда которой линейно зависит от расстояния. По мере распространения волны Фойгта в кристалле происходит постепенная трансформация ее поляризации: оси эллипса поляризации поворачиваются на 90° , а направление вращения не меняется.

При изучении поглощающих гиротропных кристаллов оказывается полезным также метод фотоакустической спектроскопии, основанный на эффекте генерации звука при поглощении лазерных импульсов в веществе. К достоинствам этого метода можно отнести его применимость в случае сильнопоглощающих веществ, а также в случае образцов с неидеальной поверхностью. Сильная зависимость циркулярного дихроизма гиротропных сред от их внутренней структуры позволяет получать из оптических спектров важную информацию о строении биологических объектов и химических соединений, а также электронных состояниях кристаллических образцов. Г. С. Митюрин в статье [31] рассмотрел фотоакустический эффект в оптически активных немагнитных кубических кристаллах. Получено выражение для результирующего фотоакустического сигнала и показано, что его величина определяется теплофизическими характеристиками материалов ячейки, параметрами поглощения ϵ'' и α'' , эллиптичностью и частотой модуляции падающего света, а также геометрическими размерами ячейки. Статьи [32, 33] посвящены развитию метода пьезофотоакустической спектроскопии линейных и нелинейных гиротропных пьезоэлектриков. Исследованы резонансные явления и определены условия их существования. Предложен метод определения мнимой части параметра гирации по экспериментальному измерению амплитудных характеристик фотоакустических сигналов, соответствующих правой и левой круговым поляризациям падающего излучения. Статьи [34, 35] посвящены исследованию возможности использования фотоакустического метода для определения параметров поглощения и дихроизма кристаллов средних сингоний.

С развитием технологии полупроводниковых приборов, в частности интегральных схем, представляющих собой сложную многослойную структуру с использованием полупроводников разного типа проводимости, возрос интерес к изучению свойств периодических структур. Возможность получения и применения в технологии новых материалов, у которых по аналогии с полупроводниковыми структурами будет периодически меняться некоторая физическая величина, объясняет повышенный интерес к изучению композитов. Интересным эффектом является наличие диапазонов прозрачности и непрозрачности, которые наблюда-

ются для различных типов излучения в спектре пропускания периодической структуры. В оптике последние используются, например, при изготовлении диэлектрических фильтров и зеркал резонаторов, которые представляют собой чередующиеся слои с различными диэлектрическими постоянными, или для трехмерной оптической записи информации [36]. Слоистые среды, полученные из оптически нелинейных полимерных материалов, находят применение в динамической голографии, зеркалах с обращением волнового фронта, двумерном оптическом воспроизведении [37]. В гидроакустике периодические структуры с различными акустическими импедансами используются в качестве резонансных покрытий микрофонов, отражающих экранов, сонаров и при конструировании систем подводного обнаружения. Возможно применение таких структур в системах высокоточного машиностроения для уменьшения вибрации оборудования в заданном диапазоне частот.

В связи с развитием микроэлектроники в последнее время интенсивно исследуется ситуация, когда один из слоев периодической структуры заменяется материалом со свойствами (показатель преломления, тип проводимости, коэффициент поглощения, плотность и т.д.), нарушающими периодичность. В этом случае в зоне непрозрачности спектра пропускания электромагнитного излучения появляется узкий локальный максимум [37]. Подобная ситуация имеет место, когда в кристаллическую решетку полупроводника внедряют атом примеси, который дает разрешенное энергетическое состояние в запрещенной зоне.

Лазерная оптико-акустическая диагностика гетерогенных сред также находит широкое применение в последние годы [38, 39].

В связи с постоянным совершенствованием устройств отображения и обработки информации необходим поиск новой элементной базы таких устройств. Слоисто-периодическая структура является удобной основой для таких устройств ввиду управляемости ее свойствами в процессе изготовления и эксплуатации. Кроме того, технология получения слоисто-периодических структур не является чрезвычайно сложным процессом и в настоящее время существует много способов ее создания.

В последние годы большое внимание уделяется созданию искусственных структур, обладающих магнитоактивными свойствами. Одним из способов создания искусственных гиротропных сред являются слоисто-периодические магнитоактивные структуры. Большая эффективность таких структур проявляется в усилении магнитооптического эффекта вследствие оптической интерференции и многократного отражения волн во всей многослойной структуре. Это позволяет использовать более дешевые материалы, обладающие малым удельным вращением, что существенно при разработке дорогостоящего оборудования.

В последнее десятилетие в России и за рубежом проводился активный поиск оптимальных материалов для многослойных магнитоактивных структур. Такие структуры создавались с использованием железа, меди, палладия, кобальта, платины, сплавов висмута и марганца, окислов цинка и индия, а также других материалов. Многообразие используемых сред требует корректного и последовательного исследования слоистых структур с учетом их анизотропных, поглощающих, магнитоактивных и гиротропных свойств.

На физическом факультете ГГУ им. Ф. Скорины давно ведутся фундаментальные исследования в области оптики слоисто-периодических сред, обладающих анизотропными диэлектрическими, магнитными и гиротропными свойствами.

Определены эффективные параметры, характеризующие гиротропные свойства слоисто-периодических структур в случае произвольной кристаллографической симметрии слоев [26, 27].

Предсказаны и исследованы эффекты компенсации линейного двупреломления света в гиротропных сверхрешетках и компенсации дифракции электромагнитных волн в средах со спиральной структурой.

Научные результаты докладывались на конференциях в Беларуси, Финляндии, России, Германии, Канаде, Португалии, Марокко, Бельгии [40-56].

Как показали эти исследования, использование слоисто-периодических структур, сочетающих в себе свойства составляющих их сред, расширяет возможности управления параметрами оптического излучения (поляризацией, интенсивностью и фазой отраженных и

прошедших волн). При наличии гиротропных либо магнитоактивных свойств у одного из веществ, из которых состоит слоисто-периодическая структура, возникает дополнительная возможность управления поляризацией света. Подбирая параметры оптически активного слоя, можно добиться появления оптических эффектов, селективных относительно частоты и поляризации света.

С научной точки зрения, значимость подобных исследований заключается в том, что происходит изучение новых возможностей изменения характеристик оптического излучения с помощью гиротропных слоисто-периодических структур, выявляются новые закономерности взаимодействия оптического излучения с многослойными магнитоактивными средами с целью усовершенствования методов оптической обработки информации. С практической точки зрения исследования направлены на моделирование слоисто-периодических структур, которые могут быть использованы в качестве основного элемента в устройствах, управляющих поляризацией и фазой световых волн.

Abstract. The authors present a review of the papers dedicated to the optical properties of the gyro-tropic laminar-periodic environments of materials. The usage of these materials extends the possibilities of the control over the parameters of the optical emanation.

Литература

1. J. Zak, E. R. Moog, C. Liu, S. D. Bader, J. Magn. and Magn. Mater, Additivity of the Keer effect in thin-film magnetic systems, **88**, № 3 (1990), 261–266.
2. J. Zak, E.R. Moog, C. Liu, S.D. Bader, J. Magn. Magn. Mat., **89** (1990), 107.
3. J. Zak, E. R. Moog, C. Liu, S. D. Bader, Appl. Phys. Lett., **58**, № 11 (1991), 1214.
4. О. В. Иванов, Д. И. Семенов, Кристаллография, **41**, № 5 (1996), 791.
5. О. В. Иванов, Д. И. Семенов, Кристаллография, **45**, № 3 (2000), 534.
6. О. В. Иванов, Д. И. Семенов, Кристаллография, **45**, № 5 (2000), 899.
7. В. М. Маевский, ФММ, **59**, № 2 (1985), 213.
8. O. Acher, A. L. Adenot, F. Duverger, Phys. Rev. B., **62**, № 20 (2000), 13748.
9. O. Acher, Pierre Le Gourrierec, Geraldine Perrin, Philippe Baclet et al., IEEE Trans. Microwave Theory Tech, **44**, № 5 (1996), 674.
10. O. Acher, P. Baclet, G. Perrin, O. Roblin et al., J. Magn. Magn. Mater, **157/158** (1996), 480.
11. A. L. Adenot, O. Acher, T. Taffary, P. Queffelec et al., J. Appl. Phys., **87**, № 9 (2000), 6914.
12. B. Djafari Rouhani, J. Sapriel, *Effective dielectric and photoelastic tensors of superlattices in the long-wavelength regime*, Phys. Rev. B., **34**, № 10 (1986), 7114–7117.
13. H. Yamamoto, M. Asada, Y. Suematsu, *Theory of refractive index variation in quantum well structure and related intersectional optical switch*, J. Lightwave Technol., **6**, № 12 (1988), 1831–1840.
14. Wa P. Li Kam, P. N. Robson, J. S. Roberts e.a., *All-optical switching between modes of a GaAs / GaAlAs multiple quantum well waveguide*, Appl. Phys. Lett., **52**, № 24 (1988), 2013–2014.
15. С. М. Рытов, *Электромагнитные свойства мелкослоистой среды*, Журн. эксперим. и теор. физики, **29**, № 5 (1955), 605–616.
16. С. М. Рытов, *Акустические свойства мелкослоистой среды*, Акустич. журн. **2**, № 1 (1956), 71–83.
17. А. А. Булгаков, А. И. Тимченко, *Теория вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в слоисто-периодических материалах*, Физ. тверд. тела, **28**, № 2 (1986), 510–517.
18. А. В. Вакуленко, Л. А. Чернозатонский, *Акустооптические свойства сверхрешеток в длинноволновом приближении*, Физ. тверд. тела, **30**, № 6 (1988), 1641–1645.
19. J. He, J. Sapriel, *Resonant acousto-optical interaction in superlattices*, Appl. Phys. Lett., **55**, № 22 (1989), 2292–2294.
20. M. Grimsditch, F. Nizzoli, *Effective elastic constants of superlattices of any symmetry*, Phys. Rev. B., **33**, № 8 (1986), 5891–5892.
21. E. Akcakaya, G. W. Farnel, *Effective elastic and piezoelectric constants of superlattices*, J. Appl. Phys., **64**, № 9 (1988), 4469–4473.

22. Е. Н. Киккарин, Д. В. Петров, *Эффективные упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические константы сверхрешеток*, Кристаллография, **34**, № 5 (1989), 1072–1075.
23. А. В. Вакуленко, Л. А. Чернозатонский, *Эффективные электрооптические константы непроводящих сверхрешеток*, Физ. тверд. тела, **32**, № 11 (1990), 3439–3441.
24. Gupta S. Dutta, *Validity of the long-wavelength approximation applied to a superlattice on a nonlinear substrate*, J. Opt. Soc. Amer. B., **6**, № 8 (1989), 1607–1610.
25. W. Chen, D. L. Mills, *Optical response on nonlinear multilayer structures: Bilayers and superlattices*, Phys. Rev. B., **36**, № 12 (1987), 6269–6278.
26. И. В. Семченко, *Гиротропные свойства сверхрешеток в длинноволновом приближении*, Кристаллография, **35**, № 5 (1990), 1047–1050.
27. В. Е. Гайшун, И. В. Семченко, А. Н. Сердюков, *Гиротропные свойства сверхрешеток с магнитной структурой в длинноволновом приближении*, Кристаллография, **38**, № 3 (1993), 24–27.
28. Б. В. Бокуть, С. С. Гиргель, *Электромагнитные волны в магнитоупорядоченных кристаллах, обладающих естественной оптической активностью*, Опт. и спектр., **49**, № 4 (1980), 738–741.
29. С. С. Гиргель, *Показатели преломления и векторы рефракции собственных волн в оптически активных магнитоупорядоченных кристаллах*, Опт. и спектр., **60**, № 4 (1986), 777–780.
30. Б. В. Бокуть, С. С. Гиргель, *О распространении света вдоль эллиптических сингулярных направлений поглощающих гиротропных кристаллах*, Журн. прикл. спектроскопии, **36**, № 4 (1982), 666–669.
31. Г. С. Митюрин, *Фотоакустический эффект в оптически активных средах*, Докл. АН БССР, **26**, № 5 (1982), 414–417.
32. Г. С. Митюрин, В. П. Зеленый, *Фотоакустическое преобразование в гиротропных пьезоэлектрических кристаллах*, Письма в ЖТФ, **14**, № 20 (1988), 1879–1883.
33. Г. С. Митюрин, В. П. Зеленый, *Термооптическое возбуждение звука в нелинейных пьезоэлектрических кристаллах*, Кристаллография, **36**, № 5 (1991), 1250–1253.
34. Г. С. Митюрин, *Фотоакустический метод определения параметров поглощения и дихроизма кристаллов средних сингоний*, Кристаллография, **36**, № 1 (1991), 212–213.
35. Б. В. Бокуть, Г. С. Митюрин, *Определение оптических параметров поглощающих гиротропных кристаллов фотоакустическим методом*, Кристаллография, **32**, № 4 (1987), 962–966.
36. N. I. Koroteev, S. A. Magnitskii, A. V. Tarasishin et al., *High-density three-dimensional optical data storage with photonic band-gap structures*, Laser Phys., **9**(6) (1999), 1253.
37. Hattori, N. Tsurumashi and H. Nakatsuka, *Analysis of optical nonlinearity by defect states in one-dimensional photonic crystals*, J. Opt. Soc. Am. B., **14**(2) (1997), 348.
38. А. А. Карабутов, И. М. Керштейн, И. М. Пеливанов, Н. Б. Подымова, *Измерение полного набора упругих модулей однонаправленных графито-эпоксидных композитов лазерным оптико-акустическим методом*, Тезисы конф. “Современные проблемы механики”, 1999, 228.
39. А. А. Карабутов, И. М. Керштейн, И. М. Пеливанов, Н. Б. Подымова, *Диагностика дефектов структуры композитов лазерным оптико-акустическим методом*, Тезисы конф. “Современные проблемы механики”, 1999, 229.
40. И. В. Семченко, А. Н. Сердюков, А. И. Самусенко, *Особые волны в средах со спиральной структурой*, Кристаллография, **42**, № 2 (1997), 217–220.
41. E. G. Starodubtsev, I. V. Semchenko, G. S. Mityurich, *Faraday effect and magnetogyration in superlattices in the long wavelength approximation. Advances in complex electromagnetic materials*, Edited by A. Priou, A. Sihvola, S. Tretyakov, A. Vinogradov. 3 High technology, **28**, 1997, Kluwer academic publishers, Dordrecht/Boston/London, 169–176.
42. I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola, E. A. Fedosenko, *Reflection and transmission by a uniaxially bi-anisotropic slab under normal incidence of plane wave*, J. Phys. D: Appl. Phys., **31** (1998), 2458–2464.
43. I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola, *Electromagnetic waves in artificial biaxial chiral structures with dielectric and magnetic properties*, Helsinki University of Technology. Electromagnetics Laboratory report series, Report 313, Espoo, October 1999, 17 pp.

44. I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola, *Microwave analysis of optical properties of cholesteric liquid crystals with local chirality under normal incidence of waves*, J. Phys. D: Appl. Phys., **32** (1999), 3222–3226.
45. I. V. Semchenko, V. E. Kaganovich, *Bianisotropics 2000*, Proceedings of 8th International conference on electromagnetics of complex media, 2000, 317.
46. I. V. Semchenko, V. E. Kaganovich, *Optical activity and selective reflection of light in stratified periodic structure*, In Optics of Crystals, V. V. Shepelevich, N. N. Egorov, Editors, Proceedings of SPIE, **4358** (2001), 303–308.
47. I. V. Semchenko, V. E. Kaganovich, *The oblique incidence of electromagnetic waves on gyrotropic stratified periodic structures*, International Conference “Problems of Interaction of Radiation with Matter”, Book of Abstracts, Igor V. Semchenko, Sergei A. Khakhomov (editors), Gomel, Belarus, 30 October–1 November 2001, 87.
48. И. В. Семченко, В. Е. Каганович, *Наклонное падение электромагнитных волн на гиротропные слоисто-периодические структуры*, Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины, № 6(9) (2001), С. 39–43.
49. I. V. Semchenko, V. E. Kaganovich, *Selective reflection at an oblique incidence of electromagnetic waves on stratified periodic gyrotropic structures*, Bianisotropics–2002, 9th International conference on electromagnetics of complex media, Marrakech, Morocco, May 8–11, 2002, 66.
50. V. E. Kaganovich, *Propagation of electromagnetic waves in stratified periodic gyrotropic structures at oblique incidence. Saturation of waves intensities at selective reflection*, Proceedings International Student Seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena, Helsinki, May 26–27, 2003, 38–39.
51. И. В. Семченко, В. Е. Каганович, *Влияние параметров магнитоактивной слоисто-периодической структуры на поляризацию отраженной и прошедшей волн в случае селективного отражения при наклонном падении света*, Актуальные проблемы физики твердого тела: Тез. докл. Междунар. науч. конф. к 40-летию ИФТТП НАН Беларуси и 90-летию его основателя акад. Н.Н. Сироты, 4–6 ноябр. 2003 г., Минск / Отв. ред. Н. М. Олехнович, Минск, Изд. центр БГУ, 2003, 40.
52. Г. А. Говор, И. В. Семченко, *Генерация упругих волн под действием света как механизм оптического магнитного перехода в арсениде марганца*, Актуальные проблемы физики твердого тела: Тез. докл. Междунар. науч. конф. к 40-летию ИФТТП НАН Беларуси и 90-летию его основателя акад. Н.Н. Сироты, 4–6 ноябр. 2003 г., Минск / Отв. ред. Н. М. Олехнович, Минск, Изд. центр БГУ, 2003, 69.
53. I. V. Semchenko, V. E. Kaganovich, *Selective reflection at an oblique incidence of electromagnetic waves onto stratified periodic gyrotropic structures*, S. Zouhdi et al. (eds.), Advances in electromagnetics of complex media and metamaterials, Kluwer Academic Publishers, 2003, 271–280.
54. I. V. Semchenko, V. E. Kaganovich, *Faraday effect and magnetic circular dichroism in stratified periodic gyrotropic structures*, Bianisotropics–2004, Proceedings of the 10th International Conference on Complex Media and Metamaterials, Het Pand, Ghent, Belgium, September 22–24, 2004, 110–113.
55. Г. А. Говор, И. В. Семченко, *Генерация упругих волн под действием света как механизм оптического магнитного перехода в арсениде марганца*, ЖЭТФ, **126**, №4 (10) (2004), 1–4.
56. И. В. Семченко, В. Е. Каганович, *Селективные оптические свойства многослойной периодической гиротропной структуры при произвольном угле падения волн*, Кристаллография, **49**, № 6 (2004), 1130–1135.