

Влияние потерь на оптические свойства хиральной метамембраны

Н.В. Валенко¹, О.А. Дмитриева^{1,2}, С.Г. Тиходеев^{1,2}

¹ Физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2;

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38

Аннотация

В работе теоретически исследован оптический отклик (то есть спектры отражения, пропускания и поглощения) фотонно-кристаллического слоя с квадратной решеткой хиральных отверстий с осью вращения C_2 на циркулярно-поляризованный свет. Геометрические параметры структуры подобраны для достижения максимально возможного циркулярного дихроизма отклика при условии полного отсутствия оптических потерь в системе. Показано, что добавление потерь в тонких приповерхностных слоях структуры, например, вследствие рассеяния на неоднородностях поверхности или поглощения из-за металлизации приповерхностных слоев, приводят к быстрой деградации степени хиральности оптического отклика с ростом величины поглощения. Расчеты проведены для хирального фотонно-кристаллического слоя, изготовленного из алмаза, для диапазона длин волн $\lambda = 10 - 12$ мкм (волновое число $830 - 1000$ см⁻¹).

Ключевые слова: фотонно-кристаллические слои, метаповерхности, метамембраны, хиральность, циркулярный дихроизм, максимальная хиральность.

Цитирование: Валенко, Н.В. Влияние потерь на оптические свойства хиральной метамембраны / Н.В. Валенко, О.А. Дмитриева, С.Г. Тиходеев // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 6. – С. 816-821. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1479.

Citation: Valenko NV, Dmitrieva OA, Tikhodeev SG. Effect of losses on optical properties of chiral metamembranes. Computer Optics 2024; 48(6): 816-821. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1479.

Введение

Явления, возникающие при взаимодействии электромагнитных волн с хиральными системами и приводящие к возникновению циркулярного дихроизма отражения, пропускания и поглощения, широко известны и находят ряд применений в различных областях [1–6], в том числе и таких важных, как медицинская промышленность [7]. Подобные явления возникают, например, в хиральных метаматериалах и метаповерхностях, которые при небольших (субволновых) толщинах позволяют контролировать и преобразовывать электромагнитные волны в широких пределах [8–11]. До появления хиральных метамембран основным способом управления дихроичными свойствами света было использование холестерических жидких кристаллов, см. в работах [12, 13]. Интересный способ создания циркулярного дихроизма, основанный на включении оптически активного слоя в кольцевой резонатор, был предложен в работе [14].

Хиральные метаповерхности обладают широким многообразием оптических свойств [15]. В последнее время особый интерес вызывают метаповерхности с так называемой максимальной хиральностью, например, полностью пропускающие излучение одного знака циркулярной поляризации со сменой знака циркулярной поляризации и отражающие излучение другого знака циркулярной поляризации без конверсии [16–27].

Один из подходов, применяемых при разработке метаповерхностей для взаимодействия с циркулярно

поляризованным светом, связан с изготовлением плазмонных структур [28–31]. Однако недостатком подобных структур является наличие значительных потерь на поглощение и связанной с ними низкой эффективностью интенсивности оптических преобразований [24, 32, 33]. Выходом является использование прозрачных диэлектрических систем, которые позволяют достичь требуемого результата при отсутствии потерь [17, 25].

Однако даже при изготовлении образцов из прозрачных диэлектриков возникают потери, связанные, например, с рассеянием на дефектах реально изготавливаемой структуры. Этим можно объяснить уширение резонансов и уменьшение пиковых значений характерных величин, например, коэффициентов отражения или пропускания в заданной поляризации или степени циркулярной поляризации отражения или пропускания в экспериментах по сравнению с теоретическими расчётами [18, 27]. Кроме того, в некоторых случаях изготовление метаповерхности может сопровождаться модификацией ее приповерхностных слоев, например, металлизацией, как это происходит вследствие графитизации поверхности при лазерной абляции алмаза [34].

В данной работе теоретически исследовано влияние поверхностных дефектов изготовления или металлизации на оптические спектры хиральной метаповерхности из прозрачного диэлектрика с номинально максимальной хиральностью отражения и пропускания. Наличие приповерхностных рассеива-

ющих дефектов или металлизации моделировалось увеличением мнимой части показателя преломления тонких приповерхностных слоев метаповерхности. В качестве примера рассмотрена хиральная метаповерхность (метамембрана) из алмаза для диапазона длин волн $\lambda = 10 - 12$ мкм (частоты $830 - 1000$ см⁻¹). Этот диапазон длин волн входит в окно прозрачности атмосферы, в нем активно ведутся разработки мощных лазерных источников, для управления излучением которых требуется создание новой радиационно-стойкой оптики. Подходящим кандидатом

для этой цели является алмаз, обладающий прозрачностью, химической инертностью и рекордной теплопроводностью.

В работе исследуется метамембрана в виде квадратной решетки с элементарной ячейкой, показанной на рис. 1, в подписи к которому приведены все ее размеры. Поскольку период решетки порядка 7 мкм меньше длины волны света в интересующем нас диапазоне 10–12 мкм, все дифракционные каналы закрыты и мембрана ведет себя как однородный слой с хиральным откликом, то есть является хиральной метамембраной.

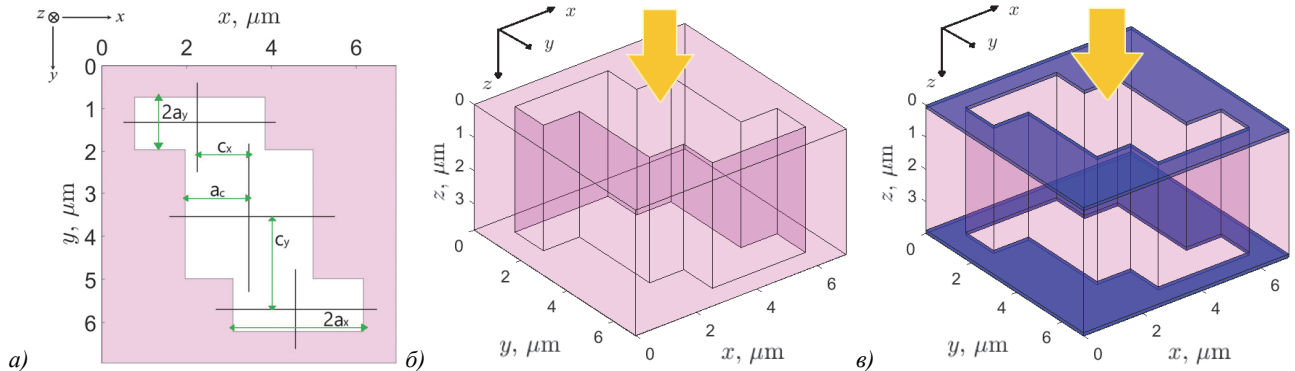


Рис. 1. Схематическое изображение элементарной ячейки хиральной метамембраны, представляющей собой квадратную ячейку в плоскости xy . Размеры ячейки оптимизированы для алмаза с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_D = 5,76$ (показан фиолетовым цветом) и достижения максимальной хиральности на длине волны 11 мкм и равны $p_x = p_y \times h$, $p_x \times p_y = 6,95$ мкм, $h = 4$ мкм (здесь и ниже все размеры даны в микронах, если специально не указана размерность). (а) Вид сверху. Размер центрального квадрата $2a_c \times 2a_c$, $a_c = 1,51$. Центры боковых прямоугольников смещены в точки с координатами $(\pm c_x \times \pm c_y)$, $c_x = 1,16$, $c_y = 2,12$ и их размеры $(2a_x \times 2a_y)$, $a_x = 1,54$, $a_y = 0,62$. (б-в) Вид сбоку. В панели (в) сверху и снизу добавлены для описания потерь на рассеяние и/или поглощающие слои (выделены синим цветом) толщины $h_A = 100$ нм и с комплексной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_A = \epsilon_A' + i\epsilon_A''$. Плоская электромагнитная волна падает на структуру по нормали к ней (оранжевые стрелки на панелях (б) и (в))

Что касается выбора геометрии ячейки, мы стартовали с геометрии хиральной метамембраны, предложенной в работе [16], но из другого материала (SiN) и для длины волны в ближнем ИК-диапазоне 870 нм. Элементарная ячейка предложенной в [16] метамембраны содержит три отверстия – цилиндрическое в центре ячейки и два эллиптической формы по бокам. Поскольку, однако, мы ориентировались на другую возможную технологию изготовления метамембраны, метод лазерной абляции, представлялось разумным объединить эти три отверстия в одно, но более сложной формы (что позволяет в три раза уменьшить число лазерных импульсов на ячейку). При реальном изготовлении такой метамембраны, конечно, отверстия неизбежно будут с закругленными краями. Однако учет такой закругленности привел бы к существенному замедлению численного счета с использованием адаптивного пространственного разрешения [37–39]. Замена закругленных отверстий прямоугольными не приводит, как показывают наши расчеты, к качественному изменению оптического отклика в случае диэлектрических материалов метамембраны.

Для расчета спектров коэффициентов пропускания, отражения и поглощения в исследуемых слоистых пространственно-модулированных структурах

было использовано фурье-модальное разложение и метод оптической матрицы рассеяния [35], реализованные в пакете Матлаб с применением так называемых правил факторизации Ли (Li's factorization rules, [36]), а также адаптивного пространственного разрешения Гране (Granet's adaptive spatial resolution, [37–39]). Метод состоит в разделении структуры на однородные в перпендикулярном направлении слои (например, для структуры на рис. 1б воздух, фотонный кристалл с вертикальными стенками, воздух), решении в этих слоях уравнений Максвелла в базе плоских волн на обратной решетке фотонного кристалла и сшивке решений в соседних слоях в соответствии с граничными условиями для уравнений Максвелла. И факторизация Ли, и адаптивное пространственное разрешение Гране позволяют уменьшить влияние эффекта Гиббса, приводящего к неточностям разложений в конечном фурье-базисе. Например, адаптивное пространственное разрешение предполагает фурье-модальное разложение в пространстве, неоднородно растянутом вокруг границ метаматериала с резким изменением диэлектрической проницаемости. Во всех приведенных ниже расчетах циркулярно-поляризованная монохроматическая электромагнитная волна падает по нормали к поверхности.

В базисе круговых поляризаций оптические коэффициенты делятся на описывающие отражение и пропускание без конверсии направления вращения поля в пространстве (безотносительно к направлению распространения волны) и с конверсией. Последние отсутствуют в структурах с вращательной осью симметрии $C_n, n \geq 3$ [21], однако в нашем случае $n=2$, конверсия, вообще говоря, имеется и циркулярный дихроизм пропускания и отражения возникает даже при отсутствии потерь.

Исследование

Обозначим коэффициенты отражения по интенсивности из лево-циркулярно поляризованного состояния (LCP – от англ. Left Circular Polarization) в право-циркулярно поляризованное (RCP) R_{rl} и наоборот, из RCP в LCP – R_{lr} . Аналогично для коэффициентов пропускания из LCP в LCP – T_{ll} и из RCP в RCP – T_{rr} . Такие процессы рассеяния не сопровождаются сменой направления вращения в пространстве. Мы используем стандартные для оптики обозначения компонент циркулярно поляризованного света, которые привязаны не к абсолютному положению в пространстве, а к направлению распространения волны. Поэтому, например, при отражении с сохранением направления вращения поля в пространстве в обсуждении выше правая циркулярная поляризация пере-

ходит в левую и наоборот. Аналогично обозначены и коэффициенты со сменой направления вращения: для отражения (пропускания) из LCP в LCP (RCP) – R_{ll} (T_{rl}) и т.д. Оптические коэффициенты по интенсивности являются положительными числами, поскольку связаны с соответствующими комплексными амплитудными коэффициентами соотношениями

$$R_{ll} = |r_{ll}|^2, \quad T_{rl} = |t_{rl}|^2, \quad \dots \quad (1)$$

Вследствие симметрии по отношению к обращению во времени (см., например, в [21]) амплитудные коэффициенты без смены направления вращения равны

$$r_{lr} = r_{rl}, \quad t_{rr} = t_{ll}. \quad (2)$$

Поэтому в соответствии с (1)

$$R_{lr} = R_{rl}, \quad T_{rr} = T_{ll}. \quad (3)$$

“Расчетные оптические спектры описанной выше метамембраны в случае отсутствия потерь показаны на панелях а) и б) рис. 2, для падающей LCP- и RCP-волны, соответственно. Сплошными линиями показаны процессы без смены направления вращения (вследствие соотношения (3) они одинаковы в панелях а) и б), а штриховыми – со сменой направления вращения”.

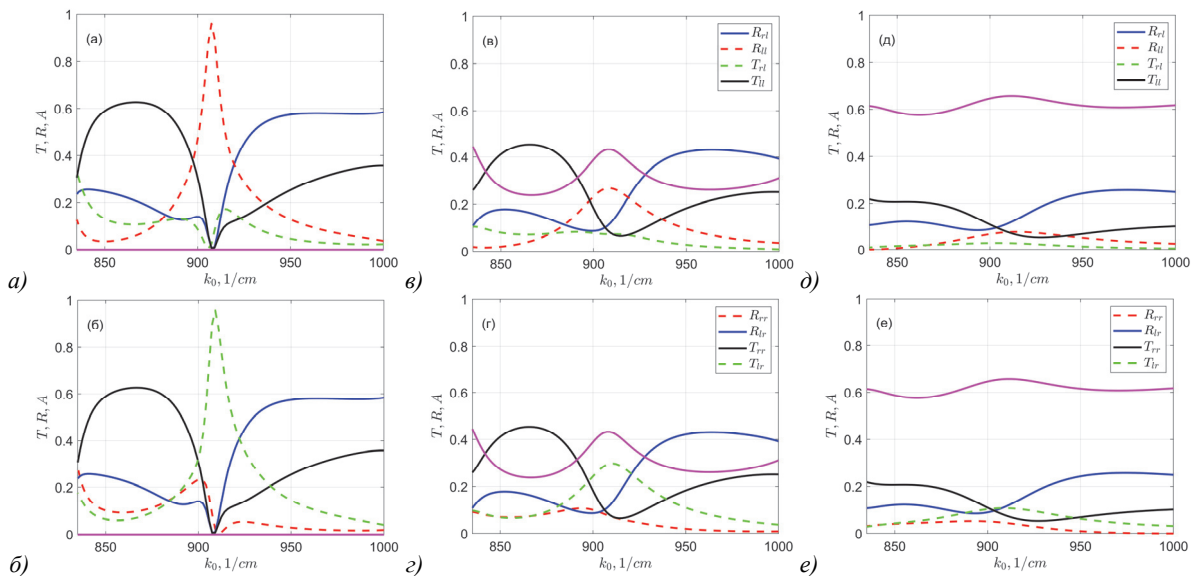


Рис. 2. Спектры отражения, пропускания и поглощения структуры в базисе круговых поляризаций для левой (панели (а, в, д)) и правой (панели (б, г, е)) круговых поляризаций входного излучения. Спектры потерь в соответствующих круговых поляризациях показаны фиолетовыми сплошными линиями на всех панелях. Панели ((а, б)), ((в, г)) и ((д, е)) рассчитаны соответственно для $\epsilon_A' = \epsilon_D$ и $\epsilon_A'' = 0,5$ и 20 . Волновое число $k_0 = 1/\lambda$.

Узкий резонанс вблизи длины волны 11 мкм как раз и демонстрирует максимально возможный циркулярный дихроизм отражения и пропускания (максимально возможную хиральность) оптимизированной метамембраны: падающий на структуру право поляризованный свет с длиной волны вблизи 11 мкм практически полностью проходит через метамембрану с конверсией в лево

поляризованный, а лево поляризованный практически полностью отражается в лево поляризованный свет, как видно из рис. 1а, б. Приведенные выше геометрические параметры хиральной структуры были численно оптимизированы нами методом градиентного спуска именно для получения оптического отклика с максимальной хиральностью.

На рис. 3 показаны практически достигающие предельных значений ± 1 спектры степени циркулярного дихроизма отражения и пропускания, определенные как

$$CDR = \frac{R_l - R_r}{R_l + R_r}, CDT = \frac{T_l - T_r}{T_l + T_r}, \quad (4)$$

где $R_l = R_{rl} + R_{ll}$ и т.д.

Насколько нам известно, впервые максимально хиральные метаповерхности с геометрией такого типа были представлены в работе [16] для метаматериала на основе нитрида кремния и для длины волны в оптическом

диапазоне. На рис. 2*в–е* показаны рассчитанные оптические спектры метамембраны при включении в нее поглощающих слоев толщины 100 нм (с сохранением полной толщины мембраны), как показано на рис. 1*в*, и с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{A'} = \epsilon_D$ и $\epsilon_{A''} = 5$ (панели *в*, *з*) и 20 (панели *д*, *е*).

Фиолетовые линии на всех панелях рис. 2 показывают спектр коэффициента поглощения структуры в соответствующих циркулярных поляризациях

$$A_l = 1 - R_l - T_l, \quad A_r = 1 - R_r - T_r. \quad (5)$$

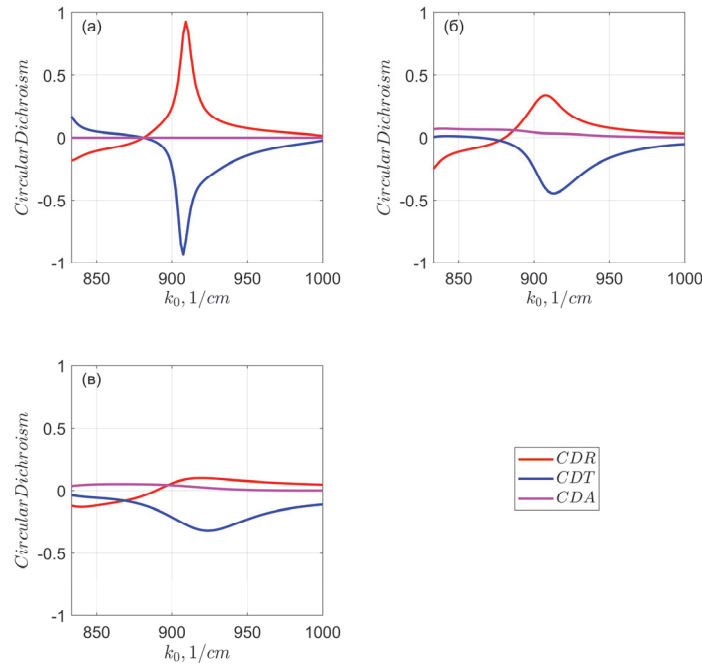


Рис. 3. Степень циркулярного дихроизма отражения, пропускания и поглощения. Панели (а), (б) и (в) рассчитаны соответственно для $\epsilon_{A'} = \epsilon_D$ и $\epsilon_{A''} = 0,5$ и 20, как и на рис. 2

Видно, что хиральность оптических свойств метамембраны, в пределе полного отсутствия потерь обладающей максимальной хиральностью, быстро деградирует с добавлением потерь, и в случае большой величины последних практически исчезает. Физическая причина этого очевидна и связана с резонансным нарастанием поглощения на частоте резонанса. Это хорошо видно по эволюции спектров поглощения на рис. 2, а также по поведению с нарастанием поглощения спектра циркулярного дихроизма нашей метамембраны, показанному на рис. 3*б* и возникающему, из-за этого ослабления оптических переходов со сменной циркулярной поляризации.

Из рис. 3 также видно, что степень циркулярного дихроизма поглощения в рассматриваемой метамембране, определенная как

$$CDA = \frac{A_l - A_r}{A_l + A_r}, \quad (6)$$

во всех рассмотренных случаях невелика. При отсутствии потерь она мала из-за симметрии по отношению к обращению во времени и, собственно,

отсутствия поглощения, а при умеренных и больших потерях мала из-за резонансно увеличивающегося поглощения. А то, что циркулярный дихроизм пропускания остается большим в пределе сильного поглощения, обязано малости величины пропускания в этом случае.

Отметим, что значение мнимой части диэлектрической проницаемости $\epsilon_{A''} = 20$ по порядку величины соответствует мнимой части диэлектрической проницаемости графитизированного алмаза в этом частотном диапазоне [34]. Графитизация обычно возникает в процессе лазерной обработки (абляции) алмаза, и это обстоятельство, в свете полученных результатов, следует иметь в виду при отработке соответствующих технологий. Добавим также, что практически во всех работах, посвященных рассматриваемым резонансам с максимальной хиральностью, экспериментальные значения степени циркулярного дихроизма, как правило, значительно отличаются от расчетных, всегда в сторону уменьшения [18, 27]. Но у этого свойства есть и возможное положительное следствие – видно, что хиральные структуры такого типа весьма чув-

ствительны к чистоте поверхности, и поэтому могут быть полезными для сенсорики.

Заключение

В заключение укажем, что нами было проанализировано влияние потерь на оптические свойства диэлектрических метамембран, в случае отсутствия потерь демонстрирующих свойство максимальной хиральности оптического отклика. Показано, что с ростом потерь степень хиральности быстро уменьшается и вовсе исчезает в пределе больших потерь.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-22-00961).

References

- [1] Kelly SM, Jess TJ, Price NC. How to study proteins by circular dichroism. *Biochim Biophys Acta Proteins Proteom* 2005; 1751(2): 119-139. DOI: 10.1016/j.bbapap.2005.06.005.
- [2] Whitmore L, Wallace BA. Protein secondary structure analyses from circular dichroism spectroscopy: methods and reference databases. *Biopolymers* 2008; 89(5): 392-400. DOI: 10.1002/bip.20853.
- [3] Farshchi R, Ramsteiner M, Herfort J, Tahraoui A, Grahn HT. Optical communication of spin information between light emitting diodes. *Appl Phys Lett* 2011; 98(16): 162508. DOI: 10.1063/1.3582917.
- [4] Zhang Y, Arias-Muñoz JC, Cui X, Sun Z. Prospect of optical chirality logic computing. *Appl Phys Lett* 2023; 123(24): 240501. DOI: 10.1063/5.0178917.
- [5] Fang L, Luo HZ, Cao XP, Zheng S, Cai XL, Wang J. Ultra-directional high-efficiency chiral silicon photonic circuits. *Optica* 2019; 6(1): 61-66. DOI: 10.1364/OPTICA.6.000061.
- [6] Lodahl P, Mahmoodian S, Stobbe S, Rauschenbeutel A, Schneeweiss P, Volz J, Pichler H, Zoller P. Chiral quantum optics. *Nature* 2017; 541: 473-480. DOI: 10.1038/nature21037.
- [7] Gildeeva GN, Smirnova IG. Circular dichroism in study of drug chirality [In Russian]. *Antibiotics and Chemotherapy* 2011; 56(1-2): 43-45.
- [8] Urbas A, Jacob Z, Negro L, Engheta N, Boardman A, Egan P, Khanikaev A, Menon V, Ferrera M, Kinsey N, DeVault C, Kim J, Shalae V, Boltasseva A, Valentine J, Pfeiffer C, Grbic A, Narimanov E, Zhu L, Chanda D. Roadmap on optical metamaterials. *J Opt* 2016; 18. DOI: 10.1088/2040-8978/18/9/093005.
- [9] Yu N, Genevet P, Kats MA, Aieta F, Tetienne JP, Capasso F, Gaburro Z. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction. *Science* 2011; 334(6054): 333-337. DOI: 10.1126/science.1210713.
- [10] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces. *Nat Mater* 2014; 13: 139-150. DOI: 10.1038/nmat3839.
- [11] Sun S, He Q, Xiao S, Xu Q, Li X, Zhou L. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves. *Nat Mater* 2012; 11: 426-431. DOI: 10.1038/nmat3292.
- [12] Gevorgyan AH, Golik SS. Features of magneto-optics of dichroic cholesteric liquid crystals. *Computer Optics* 2021; 45(6): 839-847. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-928.
- [13] Vetrov SYa, Timofeev IV, Shabanov VF. Localized modes in chiral photonic structures. *Phys Usp* 2020; 63: 33-56. DOI: 10.3367/UFNe.2018.11.038490.
- [14] Alexeyev CN, Barshak EV, Vikulin DV, Lapin BP, Yavorsky MA. Induced dichroism in fiber optical resonators with an embedded optically active element. *Computer Optics* 2021; 45(2): 200-207. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-750.
- [15] Asefa SA, Shim S, Seong M, Lee D. Chiral metasurfaces: A review of the fundamentals and research advances. *Appl Sci* 2023; 13(19): 10590. DOI: 10.3390/app131910590.
- [16] Semnani B, Flannery J, Al Maruf R, Bajcsy M. Spin-preserving chiral photonic crystal mirror. *Light Sci Appl* 2020; 9: 23. DOI: 10.1038/s41377-020-0256-5.
- [17] Hu Z, He N, Sun Y, Jin Y, He S. Wideband high-reflection chiral dielectric metasurface. *Prog Electromagn Res* 2021; 172: 51-60. DOI: 10.2528/PIER21121903.
- [18] Li J, Li J, Zheng C, Yang Y, Yue Z, Hao X, Zhao H, Li F, Tang T, Wu L, Li J, Zhang Y, Yao J. Lossless dielectric metasurface with giant intrinsic chirality for terahertz wave. *Opt Express* 2021; 29(18): 28329-28337. DOI: 10.1364/OE.430033.
- [19] Wang R, Wang C, Sun T, Hu X, Wang C. Simultaneous broadband and high circular dichroism with two-dimensional all-dielectric chiral metasurface. *Nanophotonics* 2023; 12(21): 4043-4053. DOI: 10.1515/nanoph-2023-0407.
- [20] Li J, Yue Z, Li J, Zheng C, Zhang Y, Yao J. Ultranarrowband terahertz circular dichroism driven by planar metasurface supporting chiral quasi bound states in continuum. *Opt Laser Technol* 2023; 161: 109173. DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109173.
- [21] Voronin K, Taradin AS, Gorkunov MV, Baranov DG. Single-handedness chiral optical cavities. *ACS Photon* 2022; 9(8): 2652-2659. DOI: 10.1021/acsp Photonics.2c00134.
- [22] Gorkunov M, Antonov A. Rational design of maximum chiral dielectric metasurfaces. In Book: Shalin AS, Valero AC, Miroschnichenko A, eds. *All-dielectric nanophotonics*. Elsevier; 2024: 243-286. DOI: 10.1016/B978-0-32-395195-1.00014-4.
- [23] Schäfer C, Baranov DG. Chiral polaritonics: Analytical solutions, intuition, and use. *J Phys Chem Lett* 2023; 14(15): 3777-3784. DOI: 10.1021/acsp Photonics.2c00286.
- [24] He C, Sun T, Guo J, Cao M, Xia J, Hu J, Yan Y, Wang C. Chiral metalens of circular polarization dichroism with helical surface arrays in mid-infrared region. *Adv Opt Mater* 2019; 7(24): 1901129. DOI: 10.1002/adom.201901129.
- [25] Wang C, Wang C. Interference-enhanced chirality-reversible dichroism metalens imaging using nested dual helical surfaces. *Optica* 2021; 8(4): 502-510. DOI: 10.1364/OPTICA.418128.
- [26] Li J, Liu X, Wang Y, Xu H, Li H, Yue Z, Yang Y, He Y, Liang X, Luo L, Tang T, Yao JQ. Chiral metasurface zone plate for transmission-reflection focusing of circularly polarized terahertz waves. *Opt Lett* 2023; 48(18): 4833-4836. DOI: 10.1364/OL.501704.
- [27] Kwon H, Faraon A. NEMS-tunable dielectric chiral metasurfaces. *ACS Photon* 2021; 8(10): 2980-2986. DOI: 10.1021/acsp Photonics.1c00898.
- [28] Zhao Y, Askarpour AN, Sun L, Shi J, Li X, Alù A. Chirality detection of enantiomers using twisted optical metamaterials. *Nat Commun* 2017; 8(1): 14180. DOI: 10.1038/ncomms14180.
- [29] Khanikaev A, Arju N, Fan Z, Purtseladze D, Lu F, Lee J, Sarriguarte P, Schnell M, Hillenbrand R, Belkin M, Shvets G. Experimental demonstration of the microscopic origin of circular dichroism in two-dimensional metamaterials.

- Nat Commun 2016; 7: 12045. DOI: 10.1038/ncomms12045.
- [30] Poulidakos LV, Thureja P, Stollmann A, De Leo E, Norris DJ. Chiral light design and detection inspired by optical antenna theory. Nano Lett 2018; 18(8): 4633-4640. DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b00083.
- [31] Lin CY, Liu CC, Chen YY, Chiu KY, Wu JD, Lin BL, Wang CH, Chen YF, Chang SH, Chang YC. Molecular chirality detection with periodic arrays of three-dimensional twisted metamaterials. ACS Appl Mater Interfaces 2021; 13(1): 1152-1157. DOI: 10.1021/acsami.0c16256.
- [32] Yang Z, Wang Z, Tao H, Zhao M. Manipulation of wavefront using helical metamaterials. Opt Express 2016; 24(16): 18266-18276. DOI: 10.1364/OE.24.018266.
- [33] Chen Y, Yang X, Gao J. Spin-controlled wavefront shaping with plasmonic chiral geometric metasurfaces. Light Sci Appl 2018; 7: 84. DOI: 10.1038/s41377-018-0086-x.
- [34] Komlenok MS, Tikhodeev SG, Weiss T, Lebedev SP, Komandin GA, Konov VI. All-carbon diamond/graphite metasurface: Experiment and modeling. Appl Phys Lett 2018; 113(4): 041101. DOI: 10.1063/1.5037844.
- [35] Tikhodeev SG, Yablonskii AL, Muljarov EA, Gippius NA, Ishihara T. Quasiguidded modes and optical properties of photonic crystal slabs. Phys Rev B 2002; 66: 045102. DOI: 10.1103/PhysRevB.66.045102.
- [36] Li L. Fourier modal method for crossed anisotropic gratings with arbitrary permittivity and permeability tensors. J Opt A Pure Appl Opt 2003; 5: 345-355. DOI: 10.1088/1464-4258/5/4/307.
- [37] Granet G. Reformulation of the lamellar grating problem through the concept of adaptive spatial resolution. J Opt Soc Am A 1999; 16(10): 2510-2516. DOI: 10.1364/JOSAA.16.002510.
- [38] Granet G, Plumey JP. Parametric formulation of the Fourier modal method for crossed surface-relief gratings. J Opt A Pure Appl Opt 2002; 4: S145. DOI: 10.1088/1464-4258/4/5/362.
- [39] Weiss T, Gippius NA, Tikhodeev SG, Granet G, Giessen H. Derivation of plasmonic resonances in the Fourier modal method with adaptive spatial resolution and matched coordinates. J Opt Soc Am A 2011; 28(2): 238-244. DOI: 10.1364/JOSAA.28.000238.

Сведения об авторах

Валенко Никита Владимирович, 1998 года рождения, окончил в 2021 году бакалавриат и в 2023 году магистратуру физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по специальности «Физика». В настоящее время является аспирантом на кафедре общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Сфера научных интересов: теория твердого тела, фотоника, теория неупорядоченных материалов, физика полупроводников. E-mail: valenko.nv16@physics.msu.ru

Дмитриева Ольга Алексеевна, 1998 года рождения, окончила в 2020 году бакалавриат и в 2022 году магистратуру физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по специальности «Физика». В настоящее время является аспиранткой на кафедре общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Сфера научных интересов: теория взаимодействия излучения с веществом, теория оптических нелинейных процессов, оптические свойства фотонных кристаллов и метаматериалов. E-mail: dmitrieva.oa16@physics.msu.ru

Тиходеев Сергей Григорьевич, д.ф.-м.н., профессор, член-корреспондент РАН. 1952 года рождения, окончил в 1975 году физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по специальности «Физика». С 1975 года по 1980 работал и учился в аспирантуре в Отделе теоретической физики им. И.Е. Тамма Физического института имени П.Н. Лебедева. В 1980 году защитил диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 Теоретическая физика. В 1987 году защитил диссертацию на соискание степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 Физика твердого тела. В настоящий момент работает в должности профессора на кафедре общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, а также в должности главного научного сотрудника в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Сфера научных интересов: теория твердого тела, теория взаимодействия излучения с веществом, теория неравновесных процессов, оптические свойства фотонных кристаллов и метаматериалов. E-mail: tkh@gpi.ru

ГРНТИ: 29.31.21 Оптика твердых тел

Поступила в редакцию 15 декабря 2023 г. Окончательный вариант – 12 февраля 2024 г.

Effect of losses on optical properties of chiral metamembranes

N.V. Valenko¹, O.A. Dmitrieva^{1,2}, S.G. Tikhodeev^{1,2}

¹Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russia, Leninskie Gory 1;

²Prokhorov General Physics Institute, RAS, 119991, Moscow, Russia, Vavilova street 38

Abstract

An optical response (reflection, transmission, and absorption spectra) of a photonic crystal layer with a square lattice of chiral holes with rotation axis C_2 to circularly polarized light is theoretically investigated. The geometrical parameters of the structure are selected to achieve the maximum possible circular dichroism response under the condition of complete absence of optical losses in the system. It is shown that the account of losses in thin near-surface layers of the structure, for example, due to scattering on surface roughness or absorption due to metallization of near-surface layers, leads to rapid degradation of the degree of chirality of the optical response, increasing the absorption value. Calculations are carried out for a chiral photonic crystal layer made of diamond for a wavelength range of $\lambda = 10 - 12 \text{ um}$ (wave number, $830 - 1000 \text{ cm}^{-1}$).

Keywords: photonic crystal layers, metasurfaces, metamembranes, chirality, circular dichroism, maximum chirality.

Citation: Valenko NV, Dmitrieva OA, Tikhodeev SG. Effect of losses on optical properties of chiral metamembranes. *Computer Optics* 2024; 48(6): 816-821. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1479.

Acknowledgements: The research was funded by the Russian Science Foundation under grant No. 22-22-00961.

Authors' information

Nikita Vladimirovich Valenko, (b. 1998), graduated in 2021 from Physics faculty of the Lomonosov Moscow State University with a degree in Physics. Currently he is a PhD student of General Physics and Physics of Condensed Matter department. Research interests: theory of solid state, photonics, physics of disordered systems, physics of semiconductors. E-mail: valenko.nv16@physics.msu.ru

Olga Alekseevna Dmitrieva (b. 1998), completed Bachelors' (2020) and Master's (2022) degrees in Physics from Physics faculty of the Lomonosov Moscow State University. Currently she is a PhD student of General Physics and Physics of Condensed Matter department, Physics faculty, Lomonosov Moscow State University. Research interests: theory of interaction of radiation with matter, theory of optical nonlinear processes, optical properties of photonic crystals and metamaterials. E-mail: dmitrieva.oa16@physics.msu.ru

Sergei Grigorievich Tikhodeev, D. in Physics, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences. Born in 1952, graduated in 1975 from Physics faculty of the Lomonosov Moscow State University, specializing in Physics. From 1975 to 1980, he worked and studied in the postgraduate program at the I.E. Tamm Theoretical Physics department. From 1975 to 1980 he worked and studied at the I.E. Tamm Theoretical Physics department at the Lebedev Physical Institute. In 1980 he defended his thesis for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences in the specialty 01.04.02 Theoretical Physics. In 1987 he defended his thesis for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences, specialty 01.04.07 Solid State Physics. At present he works as a professor of General Physics and Condensed State Physics department of Physics faculty of the Lomonosov Moscow State University, as well as in the position of Chief Scientific Associate at the A.M. Prokhorov Institute of General Physics of the Russian Academy of Sciences. Mr. Prokhorov is a senior researcher at the A.M. Prokhorov Institute of General Physics of the Russian Academy of Sciences. Research interests: solid state theory, theory of interaction of radiation with matter, theory of nonequilibrium processes, optical properties of photonic crystals and metamaterials. E-mail: tkh@gpi.ru

Received December 15, 2023. The final version – February 12, 2024.
