

Received: 24.09.2024

Revised: 02.11.2024

Accepted: 22.11.2024

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.163-169

REFRACTIVE INDEX OF LIGHT FROM A CONDENSED MATTER. NEW VERSION

A. V. Druzhinin^{1, 2, a} and T. V. Kuznetsova^{1, 2, b, *}

¹*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620137, Russia*

²*Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russia*

^a  <https://orcid.org/0000-0001-9444-096X>  av-druzhinin-av@yandex.ru;

^b  <https://orcid.org/0000-0003-4302-9607>  kuznetsova@imp.uran.ru

*Corresponding author. Email: kuznetsova@imp.uran.ru

Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoy, 18, Ekaterinburg, 620108, Russia

Тел.: +7 (919) 378-8589

The study analytically relates macroscopic electrodynamic characteristics to the optical constants of a condensed isotropic matter. The language of hypercomplex algebra is used. The resulting solution is extended to the anisotropic case.

Keywords: optical constants, electrodynamic characteristics, condensed matter, quaternions, angular momentum: spin and orbital

Acknowledgments

The research was performed under the state assignment from Russian Ministry of Science and Higher Education, theme Spin, No 122021000036-3, and theme Function, No 122021000035-6. We express special gratitude to Vasily Vladimirovich Evstigneev for his assistance in working on the article.

References

1. Druzhinin, A.V. High-frequency electrodynamic and mechanics of anisotropic media. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2022, 5, 15–22. DOI: 10.17804/2410-9908.2022.5.015-022. Available at: http://dream-journal.org/issues/content/article_371.html
2. Ignatov, A.M. and Rukhadze, A.A. Ambiguity in the definition of the magnetic permeability of material media. *Soviet Physics Uspekhi*, 1981, 24 (9), 795–797, DOI: 10.1070/PU1981v024n09ABEH004818.
3. Ageev, N., Gridnev, V.N., Rutkin, O.G., and Smolenskii, G.A. On magnetic permeability on optical frequencies. *Fizika Tverdogo Tela*, 1983, 25 (2), 478–481. (In Russian).
4. Sokolov, A.V. *Optical Properties of Metals*, Blackie and Son, London and Glasgow, 1967, 472 p.
5. Akhmanov, S.A. and Nikitin, S.Yu. *Fizicheskaya optika* [Physical Optics]. MGU Publ., Moscow, 2004, 656 p. (In Russian).
6. Lukoyanov, V., Knyazev, Yu.V., Kuzmin, Yu.I., Neznakhin, D.S., Bartashevich, M.I. Magnetic moments, electronic structure, and optical spectroscopy of cobalt-based intermetallic compounds YCo₃, Y₂Co₇, and LaCo₅. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2020, 131 (4), 600–606. DOI: 10.1134/S1063776120080026.
7. Kantor, I.L. and Solodovnikov, A.S. *Giperkompleksnye chisla* [Hypercomplex Numbers]. Nauka Publ., Moscow, 1973, 144 p. (In Russian).

8. Druzhinin, A.V., Varenkov, V.I., Kochedykov, V.A., and Akashev, L.A. Mechanism of optical absorption in ferromagnetic materials. *Physics of the Solid State*, 2005, 47, 1526–1527. DOI: 10.1134/1.2014506.
9. Berglund, C.N. and Spicer, W.E. Photoemission studies of copper and silver: theory. *Physical Review*, 1964, 136 (4A), 1030. DOI: 10.1103/PhysRev.136.A1030.
10. *Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik*, Band 15, Metalle: Elektronische Transportphänomene, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokio, 1985.
11. Zolotarev, V.M., Morozov, V.N., and Smirnova, E.V. *Opticheskie postoyannye prirodnykh i tekhnicheskikh sred* [Optical Constants of Natural and Technical Media]. Khimiya Publ., Leningrad, 1984, 216 p. (In Russian).

Подана в журнал: 24.09.2024

УДК 535.3:537.8:51-73

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.163-169

ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА КОНДЕНСИРОВАННОЙ СРЕДЫ. НОВАЯ ВЕРСИЯ

А. В. Дружинин^{1, 2, a}, Т. В. Кузнецова^{1, 2, b, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620137, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,
пр-кт. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0001-9444-096X>  av-druzhinin-av@yandex.ru;

^b  <https://orcid.org/0000-0003-4302-9607>  kuznetsova@imp.uran.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: kuznetsova@imp.uran.ru
Адрес для переписки: ул. С. Ковалевской, д. 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия
Тел.: +7 (919) 378-85-89

В работе установлена аналитическая связь между макроскопическими электродинамическими характеристиками и оптическими константами изотропной конденсированной среды. В работе используется язык гиперкомплексной алгебры. Полученное решение обобщается на анизотропный случай.

Ключевые слова: оптические константы, электродинамические характеристики, конденсированная среда, кватернионы, момент импульса: спиновый и орбитальный

1. Введение

В двадцатом веке, с появлением квантовой механики, бурным развитием материаловедения, созданием искусственных материалов и новых источников электромагнитного излучения (лазеры и синхротронное излучение), оптика стала одной из самых широких областей науки и техники.

В настоящее время появилось огромное количество оптических научных методик, технологий и методов контроля. Развитие этих областей напрямую связано с созданием и аттестацией новых материалов с требуемыми оптическими характеристиками. Возможности природных кристаллов и их искусственных копий практически исчерпаны. Поиск новых материалов происходит на технологическом уровне методом перебора атомных составов, их концентраций, способов и режимов синтеза. Это, как правило, чрезвычайно объемная и сложная работа по поиску наилучших служебных оптических характеристик. Низкий уровень прогнозируемости результата в таком поиске вызван отсутствием адекватного математического решения, связывающего многокомпонентный комплексный показатель преломления с электродинамическими характеристиками искомой среды [1–3].

2. История

В модели макроизотропной поглощающей среды связь между ее оптическими константами (\mathbf{n} , $\mathbf{\kappa}$) и электродинамическими характеристиками установлена в виде [4]

$$(\varepsilon_1 - i\varepsilon_2)(\mu_1 - i\mu_2) = (\mathbf{n} - i\mathbf{\kappa})^2, \quad (1)$$

где ε_1, μ_1 – действительные, а ε_2, μ_2 – мнимые части диэлектрической и магнитной проницаемости соответственно; \mathbf{n} – показатель преломления; $\mathbf{\kappa}$ – коэффициент экстинкции среды; i – мнимая единица.

В силу одинаковости значений всех характеристик по любому направлению, индексы координат (взаимно ортогональных) в формуле отсутствуют. После возведения в квадрат правой части и перемножения членов из левой части уравнения (1), получаем уравнение

$$(\varepsilon_1\mu_1 - \varepsilon_2\mu_2) - i(\varepsilon_1\mu_2 + \varepsilon_2\mu_1) = (\mathbf{n}^2 - \mathbf{\kappa}^2) - i(2\mathbf{n}\mathbf{\kappa}), \quad (2)$$

Полученное уравнение (2) можно разделить на действительную и мнимую части:

$$\begin{aligned} (\varepsilon_1\mu_1 - \varepsilon_2\mu_2) &= (\mathbf{n}^2 - \mathbf{\kappa}^2), \\ (\varepsilon_1\mu_2 + \varepsilon_2\mu_1) &= 2\mathbf{n}\mathbf{\kappa}. \end{aligned}$$

Эта формула (2) принципиально правильная, но возможность получить значения четырех электродинамических характеристик из двух величин оптических констант отсутствует. Для выхода из этого «тупика» в работах Л. Ландау и Е. Лифшица было предложено приближение

$$\mu_1 = 1; \quad \mu_2 = 0, \quad (3)$$

что при подстановке в уравнение (2) и приводит к следующему:

$$\varepsilon_1 = \mathbf{n}^2 - \mathbf{\kappa}^2; \quad \varepsilon_2 = 2\mathbf{n}\mathbf{\kappa}. \quad (4)$$

Несмотря на то что эти соотношения получены в некорректном приближении (3), их до сих пор используют для нахождения «диэлектрической проницаемости» [5].

Приближение (3) родственно игнорированию закона сохранения момента импульса. Этого делать нельзя, т. к. свет с правой (+h) и левой (-h) циркулярной поляризацией неодинаково взаимодействует со спин-поляризованной электронной системой конденсированной среды. Это же подтверждают многочисленные одноэлектронные расчеты кристаллов, где комбинированные (оптические) плотности состояний $up(+h/2)$ - $down(-h/2)$ и $down(-h/2)$ - $up(+h/2)$, соответствующие электронным переходам с переворотом проекции спина, как правило, не равны [6].

Вместо исключаемой из рассмотрения высокочастотной магнитной проницаемости для объяснения частотной зависимости была введена модель Друде – Зинера. Эта кинетическая модель построена на параметрах, которые имеют исключительно подгоночный характер, а их физический смысл отсутствует:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(\omega) &= \mathbf{n}^2 - \mathbf{\kappa}^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2}, \\ \omega \cdot \varepsilon_2(\omega) &= 4\pi\sigma_1 = 2\mathbf{n}\mathbf{\kappa}\omega = 1 - \frac{\omega_p^2\gamma}{\omega^2 + \gamma^2}, \end{aligned}$$

где γ – частота «релаксации», ω_p – «плазменная» частота, которые являются подгоночными параметрами.

3. Выбор математического языка

Математическое соотношение между электродинамикой и оптикой с помощью кватернионной алгебры [7] раскрывает физический смысл электродинамических характеристик и их связь с оптическими константами. Кроме того, микроскопический смысл этих величин становится понятным как у действительных, так и у мнимых частей.

Кватернионы – это гиперкомплексная система чисел, которая описывает трехмерное и четырехмерное пространство. Алгебра мнимых единиц представлена ниже:

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1; ij = k; ji = -k; ik = -j; ki = j; jk = i; kj = -i.$$

Показатель преломления \mathbf{n} определяет значение фазовой скорости волны света в твердом теле. Направление фронта равных фаз распространения световой волны зададим по орту i . Он отвечает за направление вектора рефракции, в котором спиновые состояния направлены по ходу луча света и в его противоположном направлении. В образуемой ортами j и k плоскости, ортогональной i , лежат векторы, определяющие электромагнитную волну. Коэффициент экстинкции \mathbf{k} определяет затухание энергии поперечной волны [7]. Таким образом, уравнение связи можно записать следующим образом:

$$(i\varepsilon_1 - j\varepsilon_2)(i\mu_1 + k\mu_2) = (i\mathbf{n} - j\mathbf{k})(i\mathbf{n} + k\mathbf{k}), \quad (5)$$

$$-\varepsilon_1\mu_1 - j\varepsilon_1\mu_2 + k\varepsilon_2\mu_1 - i\varepsilon_2\mu_2 = -\mathbf{n}^2 - j\mathbf{n}\mathbf{k} + k\mathbf{k}\mathbf{n} - i\mathbf{k}^2.$$

Приравнивая реальные и мнимые части, получаем не два (2), а четыре решения:

$$\mathbf{n}^2 = \varepsilon_1\mu_1; \quad \mathbf{k}^2 = \varepsilon_2\mu_2; \quad \mathbf{n}\mathbf{k} = \varepsilon_1\mu_2; \quad \mathbf{k}\mathbf{n} = \varepsilon_2\mu_1. \quad (6)$$

Особенно интересным является совпадение величин $\varepsilon_1\mu_2$ и $\varepsilon_2\mu_1$:

$$\mathbf{n}\mathbf{k} = \varepsilon_1\mu_2 = \varepsilon_2\mu_1. \quad (7)$$

Для нахождения четырех неизвестных мы имеем четыре уравнения. Полученные результаты (6) превращают уравнение (2) в тождество.

Определим продольную i , высокочастотную диэлектрическую ε_1 и магнитную μ_1 проницаемости. Первая из них определяет изменение электродипольного состояния среды при поглощении света. Вторая, в свою очередь, – спинового состояния на той же частоте. Линейно поляризованный свет представляет собой суперпозицию право- и левоциркулярных волн, поглощение которых в общем случае не одинаковое. Каждая из этих волн, согласно закону сохранения момента импульса, должна изменить спин возбужденного состояния относительно основного на величину $\pm\hbar$. Даже в случае равенства этих спиновых токов изменяется электродипольное состояние среды на частоте ω . А суммарный спиновый ток в этом случае будет равен нулю [8]. Таким образом, для данной частоты света ω в спин-поляризованном случае электродинамические характеристики определяются следующим образом:

$$\varepsilon_1(\omega) = [1 + (a + b)], \quad (8)$$

$$\mu_1(\omega) = [1 + (a - b)], \quad (9)$$

где величины a и b – интегралы по всем переходам на данной частоте ω с переворотом спина $up(+\hbar/2)$ - $down(-\hbar/2)$ и $down(-\hbar/2)$ - $up(+\hbar/2)$ соответственно.

Величины a , b определяются по формуле Берглунда – Спайсера [9]:

$$a(\omega) = \int_{E_f}^{E_f+h\omega} g_{\uparrow}(E - h\omega)q_{\downarrow}(E)dE,$$

$$b(\omega) = \int_{E_f}^{E_f+h\omega} g_{\downarrow}(E - h\omega)q_{\uparrow}(E)dE,$$

где g и q – плотности состояний занятых и возбужденных состояний соответственно.

Все интегральные величины a и b положительны. Таким образом, величина диэлектрической проницаемости (8) $\epsilon_1(\omega) > 1$, тогда как значение магнитной проницаемости $\mu_1(\omega)$ по (9) может оказаться меньше единицы. Такое возможно в случае если интеграл b больше интеграла a . Когда $\mu_1(\omega)$ будет меньше (много меньше) единицы, произведение $\epsilon_1\mu_1$ может уменьшаться до нуля. Из графика значений оптических констант золота (рис. 1) видно, что в спектральной области (0,50–3,00 мкм) $n < 1$. Минимального значения $n = 0,13$ показатель преломления достигает при $\lambda = 0,70$ мкм. Если следовать приближению (3), то при $\mu_1 = 1$ квадрат показателя преломления обязан быть больше единицы. Но экспериментальные данные это опровергают. Количество материалов (металлы, полупроводники и диэлектрики), где показатель преломления меньше единицы, достигает нескольких десятков [10, 11].

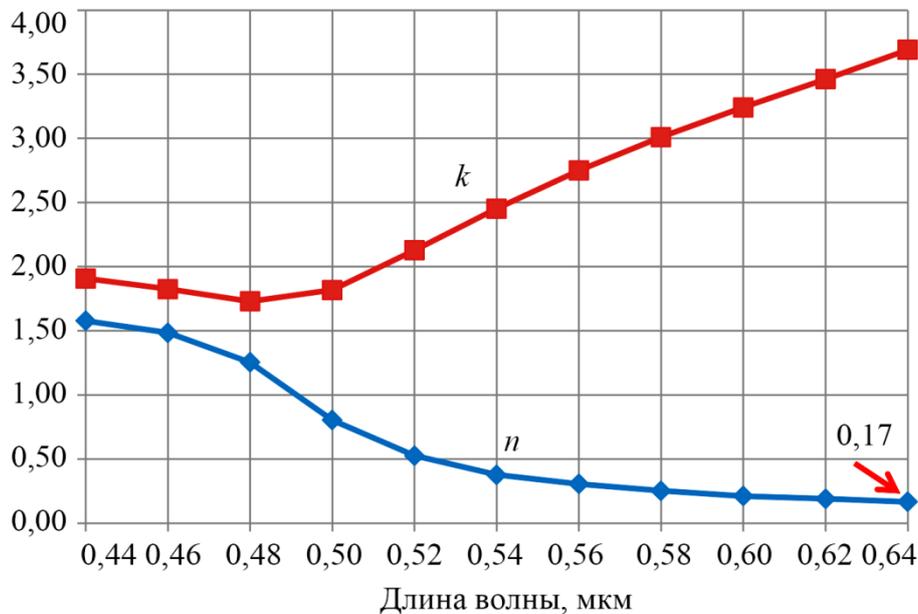


Рис. 1. Зависимость показателя преломления и затухания золота в видимой области

Переходы между спин-поляризованными состояниями могут происходить и без переворота спина, т. е. $up(+h/2)-up(+h/2)$ и $down(-h/2)-down(-h/2)$. Для выполнения закона сохранения момента импульса спин фотона должен быть поглощен орбитальными состояниями электронной системы. Электродипольный ток при переходах указанного типа определяет величину $\epsilon_2(\omega)$. Экспериментально определенные значения оптических констант вкпе с рассчитанным по (9) $\mu_1(\omega)$ позволяют получить эту величину:

$$\epsilon_2 = \frac{nk}{\mu_1}.$$

Такую же процедуру можно применить к нахождению мнимой (орбитальной) части тока момента импульса:

$$\mu_2 = \frac{nk}{\epsilon_1}.$$

4. Заключение

В настоящей работе показано, что при наличии экспериментально определенных оптических констант материала и стандартного спин-поляризованного расчета его электронных состояний можно определить частотные зависимости всех электродинамических характеристик.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках государственных заданий Минобрнауки России (тема «Спин», № 122021000036-3, и тема «Функция», № 122021000035-6). Авторы выражают отдельную благодарность Евстигнееву Василию Владимировичу за помощь в работе над статьей.

Литература

1. Druzhinin A. V. High-frequency electrodynamics and mechanics of anisotropic media // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2022. – Iss. 5. – P. 15–22. – DOI: 10.17804/2410-9908.2022.5.015-022. – URL: http://dream-journal.org/issues/content/article_371.html
2. Ignatov A. M., Rukhadze A. A. Ambiguity in the definition of the magnetic permeability of material media // *Soviet Physics Uspekhi*. – 1981. – Vol. 24 (9). – P. 795–797. – DOI: 10.1070/PU1981v024n09ABEH004818.
3. О магнитной проницаемости на оптических частотах / А. Н. Агеев, В. Н. Гриднев, О. Г. Руткин, Г. А. Смоленский // *Физика твердого тела*. – 1983. – Т. 25 (2). – С. 478–481.
4. Sokolov A. V. *Optical Properties of Metals*. – London and Glasgow : Blackie and Son, 1967, 472 p.
5. Ахманов С. А., Никитин С, Ю. *Физическая оптика : учебник*. – 2-е изд. – М. : МГУ; Наука, 2004. – 656 с.
6. Magnetic moments, electronic structure, and optical spectroscopy of cobalt-based intermetallic compounds YCo_3 , Y_2Co_7 , and $LaCo_5$ / V. Lukoyanov, Yu. V. Knyazev, Yu. I. Kuzmin, D. S. Neznakhin, M. I. Bartashevich // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 2020. – Vol. 131 (4). – P. 600–606. – DOI: 10.1134/S1063776120080026.
7. Кантор И. Л., Солодовников А. С. *Гиперкомплексные числа*. – М. : Наука, 1973. – 144 с.
8. Mechanism of optical absorption in ferromagnetic materials / A. V. Druzhinin, V. I. Varenkov, V. A. Kochedykov, L. A. Akashev // *Physics of the Solid State*. – 2005. – Vol. 47. – P. 1526–1527. – DOI: 10.1134/1.2014506.
9. Berglund C. N., Spicer W. E. Photoemission studies of copper and silver: theory // *Physical Review*. – 1964. – Vol. 136 (4A). – P. 1030. – DOI: 10.1103/PhysRev.136.A1030.
10. Landolt-Börnstein *Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik*. – Band 15 : *Metalle : Elektronische Transportphänomene*. – Berlin–Heidelberg–New York–Tokio : Springer–Verlag, 1985.
11. Золотарев В. М., Морозов В. Н., Смирнова Е. В. *Оптические постоянные природных и технических сред : справочник*. – Л. : Химия, 1984. – 216 с.