

Received: 31.10.2025

Revised: 10.12.2025



Accepted: 19.12.2025

DOI: 10.17804/2410-9908.2025.6.090-099

THE RELATION OF OPTICAL TO MECHANICAL PROPERTIES OF METALS

A. V. Druzhinin

*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620137, Russia
Ural Federal University,
19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russia*

 <https://orcid.org/0000-0001-9444-096X>  anatoliy_druzhinin@internet.ru

Corresponding author. Email: anatoliy_druzhinin@internet.ru
Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoy, 18, Ekaterinburg, 620108, Russia
Tel.: +7 (912) 265-7330

The paper discusses the quantum mechanical mechanism underlying the relation of optical to mechanical characteristics of solids. The results of the study are based on a new analytical relationship between optics and electrodynamics. A quantum mechanical basis for the correlation between the ratio of two optical constants and percentage elongation (plasticity) of metals has been found.

Keywords: optical constants, material electrodynamic characteristics, plasticity, quaternions, electronic states of condensed matter, angular momentum: spin and orbital

Acknowledgment

The research was performed under the state assignment from the Russian Ministry of Science and Higher Education, theme Function, No. 122021000035-6. Special gratitude is expressed to Vasily V. Evstigneev for his assistance in working on the paper.

References

1. Bethe, H. and Sommerfeld, A. *Electronnaya teoriya metallov* [The Electron Theory of Metals]. ONTI NKTP SSSR Publ., Moscow, Leningrad, 1938, 315 p. (In Russian).
2. Landau, L.D. and Lifshitz, E.M. *Elektrodinamika sploshnykh sred* [Electrodynamics of Continuous Media]. Gostekhizdat Publ., Moscow, 1957, 530 p. (In Russian).
3. Druzhinin, A.V. High-frequency electrodynamics and mechanics of anisotropic media. *Diagnostics, 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
4. Druzhinin, A.V. and Kuznetsova, T.V. Refractive index of light from a condensed matter. New version. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2024, 6, 163–169. DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.163-169. Available at: http://dream-journal.org/issues/2024-6/2024-6_488.html
5. Sokolov, A.V. *Optical Properties of Metals*, Blackie, London, 1967, 472 p.
6. Lukoyanov, A.V., Knyazev, Yu.V., Kuzmin, Yu.I., Neznakhin, D.S., and Bartashevich, M.I. Magnetic moments, electronic structure, and optical spectroscopy of cobalt-based intermetallic compounds YCo_3 , Y_2Co_7 , and $LaCo_5$. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2020, 131, 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. *Phys. Rev.*, 1964, 136 (4A), A1030–A1044. 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 prirodnnykh i tekhnicheskikh sred* [Optical Constants of Natural and Technical Environments]. Khimiya Publ., Leningrad, 1984, 216 p. (In Russian).
12. Landau L.D. and Lifshitz E.M. *Elektrodinamika sploshnykh sred* [Electrodynamics of Continuous Media]. Nauka Publ., Moscow, 1982, 620 p. (In Russian).
13. Golovin, V.A. and Ulyanova, E.Kh. *Svoistva blagorodnykh metallov i splavov* [Properties of Noble Metals and Alloys: Handbook]. Metallurgiya Publ., Moscow, 1964, 188 p. (In Russian).
14. Available at: <https://www.espimetals.com/>
15. Savitskii, E.M. *Blagorodnyye metally* [Noble Metals: A Handbook]. Metallurgiya Publ., Moscow, 1984, 592 p. (In Russian).
16. Rakić, A.D., Djurišić, A.B., Elazar, J.M., and Majewski, M.L. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices. *Applied Optics*, 1998, 37, 5271–5283. DOI: 10.1364/AO.37.005271.
17. Golovaskin, A.I., Levchenko, I.S., Motulevich, G.P., and Shubin, A.A. The optical properties of indium. *Soviet Physics JETP*, 1967, 24 (6), 1093–1100.
18. Hagemann, H.-J., Gudat, W., and Kunz, C. Optical constants from the far infrared to the x-ray region: Mg, Al, Cu, Ag, Au, Bi, C, and Al₂O₃. *J. Opt. Soc. Am.*, 1975, 65 (6), 742–744. DOI: 10.1364/JOSA.65.000742.

Подана в журнал: 31.10.2025



УДК 535.3:537.8:51-73:54-19

DOI: 10.17804/2410-9908.2025.6.090-099

СВЯЗЬ ОПТИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ

А. В. Дружинин

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
ул. С. Ковалевской, д. 18, Екатеринбург, 620137, Россия
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,
ул. Мира, д. 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия*

 <https://orcid.org/0000-0001-9444-096X>  anatoliy_druzhinin@internet.ru

Электронная почта: anatoliy_druzhinin@internet.ru

Адрес для переписки: ул. С. Ковалевской, д. 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия

Тел.: +7 (912) 265-73-30

В работе обсуждается квантово-механический механизм, лежащий в основе взаимосвязи оптических и механических характеристик твердых тел. Результаты настоящей работы основаны на новой аналитической связи между оптическими и электродинамическими свойствами. Установлена квантово-механическая основа корреляционной связи между величинами отношения двух оптических констант и значениями относительного удлинения (пластичности) металлов.

Ключевые слова: оптические константы, материальные электродинамические характеристики, пластичность, кватернионы, электронные состояния конденсированной среды, момент импульса: спиновый и орбитальный

1. Введение

Металлом называется светлое тело, которое ковать можно.
М. В. Ломоносов, «Первые основания металлургии или рудных дел»

Материаловедение, являясь междисциплинарной наукоемкой деятельностью, имеет в своей рабочей обойме физику твердого тела. Квантово-механический вариант физики металлов возник в 30-х годах прошлого века [1] и до сих пор остается актуальным. При развитии теории в этом направлении ограничивались большим набором устаревших моделей физики твердого тела. Главным тормозом развития была неадекватная феноменологическая теория высокочастотной электродинамики [2]. Именно поэтому все попытки связать компьютерные расчеты электронных структур металлов с их реальными оптическими константами оказались неудачными. Выяснилось также, что векторное пространство, в котором решались все задачи оптики и электродинамики, оказалось непригодным к решению случаев пониженной симметрии. Выход из обозначенных тупиков нашелся: гиперкомплексное пространство [3]. Цель данной работы – показать, что из строгого решения задачи о связи [4] «оптика – электродинамика» следует простая корреляционная связь между оптическими и механическими характеристиками.

2. История материальных констант

Задача распространения электромагнитной волны (света), которую решал Дж. Максвелл (1865 г.) – начальный этап в истории электродинамических (ЭД) характеристик материальных сред. Он определил скорость распространения волны в некой среде, равную $1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$, где ϵ_0 и μ_0 – проницаемости этой среды. Эту дробь он назвал электродинамической постоянной, которая определяет скорость света в среде. Впоследствии эту среду назвали «эфиром». В начале XX века выяснили, что «эфира» нет. Скорость распространения электромагнитных волн, равная скорости света в вакууме, стала мировой константой, а ϵ_0 и $\mu_0 = 1$.

Изучение оптических характеристик материальных сред привело к необходимости использования ЭД-характеристик, введенных Дж. Максвеллом: диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостей. Это заставило изменить толкование не только материальных ЭД-характеристик, но и показателя преломления сред. Так, поглощающие среды стали описываться комплексным показателем преломления ($\mathbf{n} - i\mathbf{k}$). Величину мнимой части \mathbf{k} называют коэффициентом экстинкции. Именно он определяет затухание волны при ее распространении в среде. Анизотропию материальных характеристик среды пытались описывать двумя комплексными тензорами $\hat{\epsilon}$ и $\hat{\mu}$. Тензор $\hat{\mu}$ использовался исключительно при решении задач магнитооптики для объяснения граничных экваториальных гиромагнитных эффектов. При этом многокомпонентность комплексного показателя преломления анизотропной среды так и не нашла своего математического языка.

Первое описание связи ЭД-характеристик и оптических констант для макроизотропной поглощающей среды оказалось правильным [5]:

$$(\epsilon_1 - i\epsilon_2)(\mu_1 - i\mu_2) = (\mathbf{n} - i\mathbf{k})^2. \quad (1)$$

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) мы получаем уравнение

$$(\epsilon_1\mu_1 - \epsilon_2\mu_2) - i(\epsilon_1\mu_2 + \epsilon_2\mu_1) = (\mathbf{n}^2 - \mathbf{k}^2) - i(2\mathbf{n}\mathbf{k}), \quad (2)$$

Правильность формулы (2) будет показана ниже. Однако возможность получить значения четырех ЭД-характеристик, зная значения двух оптических констант, отсутствует. Для выхода из этого «тупика» Л. Ландау и Е. Лифшицем [2] было предложено приближение

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

что при подстановке в уравнение (2) и приводит к равенствам

$$\epsilon_1 = \mathbf{n}^2 - \mathbf{k}^2; \quad \epsilon_2 = 2\mathbf{n}\mathbf{k}. \quad (4)$$

Несмотря на то что равенства (4) получены в некорректном приближении (3), их до сих пор используют для нахождения так называемой диэлектрической проницаемости [6].

Приближение (3) игнорирует закон сохранения момента импульса. Этого делать нельзя, так как свет с правой $+h$ и левой $-h$ циркулярной поляризацией по-разному взаимодействует со спин-поляризованной электронной системой конденсированной среды.

Работа [4] представляет новую интерпретацию, отличную от тензорного описания макроизотропной поглощающей среды. Новое описание связи между оптическими константами (\mathbf{n} , \mathbf{k}) и ЭД-характеристиками установлено в виде другого математического языка, а именно кватернионной алгебры [7]. Кватернионы – это гиперкомплексная система чисел, ко-

торая описывает трехмерное и четырехмерное пространства. 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 фотонов $\pm h$ направлены по ходу и против хода луча света. В образуемой ортами j и k плоскости, ортогональной i , лежат векторы, определяющие электромагнитную волну. Коэффициент экстинкции \mathbf{k} определяет затухание энергии поперечной волны. 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, мы получаем не два решения (2), а четыре решения связи оптических констант и ЭД-характеристик (6).

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

где ε_1, μ_1 – действительные, а ε_2, μ_2 – мнимые части диэлектрической и магнитной проницаемости соответственно, \mathbf{n} – показатель преломления, \mathbf{k} – коэффициент экстинкции среды.

Подставляя результаты (6) в первичное уравнение (2), мы получаем тождество. Полученный результат ничему не противоречит, а запись (6) показывает не только связь между оптическими константами и ЭД-характеристиками, но и жесткую связь между последними. Ниже представлена наиболее общая формула (в действительных числах) искомой связи электродинамики и оптики:

$$(\varepsilon_1^2 - \varepsilon_2^2)(\mu_1^2 - \mu_2^2) = (\mathbf{n}^2 - \mathbf{k}^2)^2. \quad (7)$$

Формула (7) работает как в изотропной, так и в анизотропной среде. Последний случай требует применения формулы (7) для каждой из трех оптических осей со своими значениями всех шести констант.

3. Плотность состояний (DOS)

Все квантовые переходы по зоне Бриллюэна рассматриваются в квазиимпульсном пространстве. Интегралы по квазиимпульсу в этой зоне на определенной энергии в совокупности дают распределение по энергии числа электронных состояний $N(E)$. Такая функция называется DOS (Density of States – плотность состояний). DOS – дифференциальное значение dN/dE . Числовые функции для каждой проекции спина отличаются друг от друга. Их малое количество обеспечивает выполнение закона сохранения импульса при поглощении потока света на данной частоте. В реальных опытах количество фотонов в таком потоке никак не меньше чем 10^{10} , т. е. единиц нВт. Поэтому, в силу одинаковости зоны Бриллюэна относительно нуля по квазиимпульсу, парные симметричные переходы возможны. Это означает, что учитываются все переходы (как не прямые, так и прямые) в этой зоне, симметричные относительно центра зоны. Другие законы сохранения (энергии и момента импульса) выполняются автоматически при расчете.

Дадим определение продольной i высокочастотной диэлектрической ϵ_1 и магнитной μ_1 проницаемости. Первая величина 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 $\pm h$. Даже в случае равенства этих спиновых токов на данной частоте ω электродипольное состояние среды изменяется всегда [8]. Таким образом, для данной частоты света ω в спин-поляризованном случае ЭД-характеристики определяются как

$$\epsilon_1(\omega) = [1 + (a + b)], \quad (8)$$

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

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

В работе [9] представлены уравнения Берглунда – Спайсера, которые показывают, что распределение энергии фото-эмиттированных электронов пропорционально произведению начальной и конечной плотностей состояний. В этих уравнениях впервые использовалась интегральная свертка плотностей состояний.

Величины a и b определяются по формуле свертки интегралов Берглунда – Спайсера:

$$a(\omega) = \int_{E_f}^{E_f+h\omega} g_{\uparrow}(E - h\omega)q_{\downarrow}(E)dE, \quad (10)$$

$$b(\omega) = \int_{E_f}^{E_f+h\omega} g_{\downarrow}(E - h\omega)q_{\uparrow}(E)dE, \quad (11)$$

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

Представленные интегралы (10) и (11) из работы [4] являются «модификацией» свертки из работы [9], так как они соблюдают спин-поляризованные расчеты. 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 формуле (9) может оказаться меньше единицы. Такое возможно, если интеграл b больше интеграла a . Когда $\mu_1(\omega)$ будет меньше (много меньше) единицы, произведение $\epsilon_1\mu_1$ будет стремиться к нулю.

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].

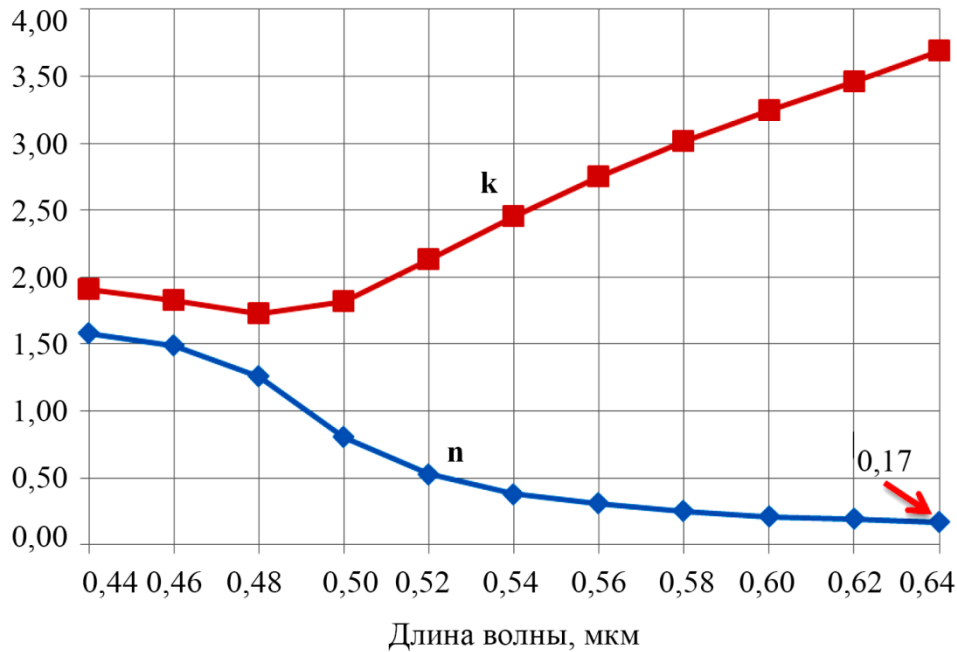


Рис. 1. Зависимость показателей преломления и затухания золота в видимой области

Переходы между спин-поляризованными состояниями могут происходить и без переворота спина. Чтобы выполнение закона сохранения момента импульса было осуществлено, 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 вместе с рассчитанным по формуле (9) $\mu_1(\omega)$ позволяют получить эту величину. Аналогично определяется мнимая (орбитальная) часть тока момента импульса:

$$\epsilon_2 = \frac{\mathbf{nk}}{\mu_1}; \mu_2 = \frac{\mathbf{nk}}{\epsilon_1}.$$

При наличии экспериментально определенных оптических констант материала и стандартного спин-поляризованного расчета его электронных состояний можно определить частотные зависимости всех ЭД-характеристик.

4. Связь оптики и механических свойств металлов

В первом издании монографии «Электродинамика сплошных сред» 1957 г. [2] Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц рассматривали вопрос о магнитной проницаемости в оптическом диапазоне (10^{13} – 10^{16} с⁻¹). Они утверждали: «Заведомо не имеет смысла пользоваться магнитной проницаемостью, уже начиная с оптической области частот, и при рассмотрении соответствующих явлений надо полагать $\mu = 1$. Учет отличия между B и H в этой области был бы явным превышением точности. Фактически же учет отличия μ от 1 является превышением точности для большинства явлений уже при частотах, гораздо более низких, чем оптические». О второй магнитной проницаемости $\mu_2 = 0$ речи даже не было.

Во втором издании книги «Электродинамика сплошных сред» 1982 г. [12], одним из редакторов которого был ученик Ландау Л. П. Питаевский, описан правильный вариант решения этого вопроса. Он звучит так: «В противоположность диэлектрической проницаемости ϵ , которая у всех тел превышает 1, магнитная проницаемость $B = \mu H$ может быть как больше, так и меньше единицы. Можно только утверждать, что всегда $\mu > 0$ ».

Ниже представлена таблица для демонстрации корреляционной связи между оптическими и механическими свойствами. В таблице находятся следующие данные для представленных металлов: максимальное относительное удлинение различных металлов [13, 14], а также отношение коэффициента экстинкции k к показателю преломления n для длины волны 5 мкм [11, 15–18]. Это соотношение в дальнейшем будем обозначать большим греческим символом Ω ($\Omega = k/n$). Выбор длины волны 5 мкм обусловлен тем, что необходима максимальная волна, близкая по энергии к значению E_f . Данные по всем металлам, которые существуют при значениях более 5 мкм, весьма ограничены в литературе. Для значения 5 мкм было найдено всего восемь металлов. Необходимо опытным путем в лаборатории провести крупное исследование по изучению оптических свойств (стандартные оптические константы материалов) и механических свойств (пластичности) для металлов в их ИК-диапазоне (более 5 мкм).

Таблица

Максимальное относительное удлинение металлов и отношение оптических констант Ω

Металл	Относительное удлинение, %	Ω для 5 мкм
магний	22	2,34
индий	41	3,30
никель	45	4,06
хром	40	4,30
палладий	45	6,60
медь	60	7,59
серебро	65	9,43
золото	65	10,77

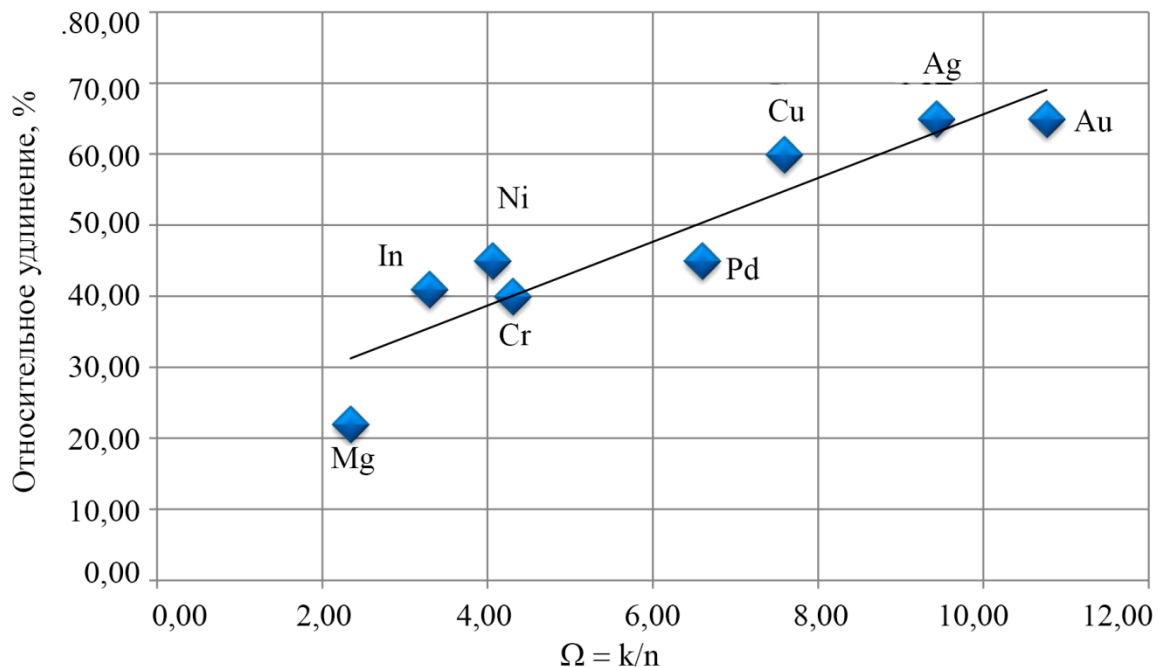


Рис. 2. График связи величины отношения оптических констант Ω с максимальным значением пластичности чистых металлов

Рассматривая данные таблицы по металлам, можно построить график зависимости значений пластичности к величине Ω на длине волны 5 мкм (рис. 2).

Приведенный выше рисунок показывает монотонную зависимость указанных величин, и при линейной аппроксимации R-фактор превышает величину 0,9.

Стоит отметить, что механические характеристики никак не привязаны к длине волны. Рассмотрим это на примере двух: металлов золота (Au) и рутения (Ru), обсуждая величину Ω на длине 1 мкм. На этой длине волны Ω золота превышает величину 30. Это максимальное значение Ω возникает за счет того, что μ_1 стремится к величине 10^{-2} , а $n = 0,13$. С другой стороны, у рутения величина Ω равна 0,91. Это рекордно низкая величина благодаря тому, что $n > k$. Из-за этого возникает чрезвычайная хрупкость рутения, что не позволяет корректно измерить механические свойства этого металла.

Полученная нами информация показывает, что существует корреляционная зависимость между оптическими и механическими свойствами, а именно между величиной Ω и значениями пластичности материала. В силу того, что настоящая работа является первой на данную тему, дальнейшее ее развитие требует серьезных фундаментальных экспериментальных исследований.

Рассмотрим две системы ювелирных сплавов: «классическую» Au–Ag–Cu и современную In–Pd. Температуры плавления металлов из этой «классической» системы находятся в одном диапазоне (960–1080 °C). При этом пластичности этих металлов тоже близки. Благодаря этим факторам их сплавы образуют твердые растворы, т. е. смешиваются в любых пропорциях, сохраняя исходную пластичность. Ювелирные изделия из этих сплавов производятся с помощью пластической деформации.

С другой стороны, температуры плавления металлов In и Pd сильно различаются: 156 и 1550 °C соответственно. Поэтому получение сплава интерметаллида In–Pd – процесс очень трудоемкий. Более того, получение сплава возможно только при фиксированных соотношениях этих металлов, а именно вблизи эквиатомного состава.

Все похожие интерметаллиды обладают одним общим свойством: повышенной твердостью. Но с другой стороны все такие соединения очень хрупки. Поэтому ювелирные изделия из этого сплава делаются с помощью литья.

5. Заключение

Настоящая работа объясняет хорошо известные факты: прозрачное хрупкое, а поглощающее пластичное. Она показывает, что причина появления самых разных физических характеристик одна: структура электронных состояний, которые определяют электродинамику вещества.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках государственных заданий Минобрнауки России (тема № 122021000035-6 «Функция»). Автор выражает отдельную благодарность Евстигнееву Василию Владимировичу за помощь в работе над статьей.

Литература

1. Бете Г., Зоммерфельд А. Электронная теория металлов / пер. с нем. К. К. Федченко; под ред. М. А. Ельяшевича. – Ленинград ; Москва : ОНТИ НКТП СССР, 1938. – 315 с.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. – М. : Гостехиздат, 1957. – 530 с.
3. Druzhinin A. V. High-frequency electrostatics 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
4. Druzhinin A. V., Kuznetsova T. V. Refractive index of light from a condensed matter. New version // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2024. – Iss. 6. – P. 163–169. –

- DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.163-169. – URL: http://dream-journal.org/issues/2024-6/2024-6_488.html
5. Sokolov A. V. Optical Properties of Metals. – London : Blackie, 1967. – 472 p.
 6. Magnetic moments, electronic structure, and optical spectroscopy of cobalt-based intermetallic compounds YCo_3 , Y_2Co_7 , and $LaCo_5$ / A. 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 // Phys. Rev. – 1964. – Vol. 136 (4A). – P. A1030–A1044. – 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.
 12. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука, 1982. – 620 с.
 13. Головин В. А., Ульянова Э. Х. Свойства благородных металлов и сплавов : справочник. – Москва : Металлургия, 1964. – 188 с.
 14. URL: <https://www.espimetals.com/>
 15. Благородные металлы : справочник / под ред. Е. М. Савицкого. – М. : Металлургия, 1984. – 592 с.
 16. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices / A. D. Rakić, A. B. Djurišić, J. M. Elazar, M. L. Majewski // Applied Optics. – 1998. – Vol. 37 (22). – P. 5271–5283. – DOI: 10.1364/AO.37.005271.
 17. The optical properties of indium / A. I. Golovashkin, I. S. Levchenko, G. P. Motulevich, A. A. Shubin // Soviet Physics JETP. – 1967. – Vol. 24 (6). – P. 1093–1100.
 18. Hagemann H.-J., Guda, W., Kunz C. Optical constants from the far infrared to the x-ray region: Mg, Al, Cu, Ag, Au, Bi, C, and Al_2O_3 // J. Opt. Soc. Am. – 1975. – Vol. 65 (6). – P. 742–744. – DOI: 10.1364/JOSA.65.000742.