

ЕЩЕ РАЗ О ФОРМУЛАХ А. ВАШИЧЕКА

П. КАРД,

член-корреспондент Академии наук Эстонской ССР

Профессор А. Вашичек опубликовал в прошлом году в этом журнале ответ [1] на критическую статью автора [2], написанную по поводу пересмотра Вашичком теории отражения и пропускания света поглощающими интерференционными покрытиями. В этой статье Вашичек пытается найти новое обоснование для своих формул, однако, по мнению автора, его доводы неубедительны. В настоящей работе покажем, во-первых, что ответ Вашичека ни в коей мере не отводит, и не ослабляет критику, и, во-вторых, что его новые соображения тоже ошибочны и не вносят в рассматриваемую проблему ничего существенно нового. Попутно будет дана новая, наиболее общая формулировка оптического принципа обратимости.

1. Теория Максвелла и формулы Вашичека

Обычная теория интерференции света в тонкослойных покрытиях основана на общепринятой теории электромагнитного поля Максвелла. Сюда относится и случай отражения и пропускания света тонким металлическим слоем. Формулы, выведенные для этого случая Мурманом [3], получены им непосредственно на основе этой теории.

Формулы Вашичека, однако, не согласуются с формулами Мурмана; кроме того, Вашичек получает свои формулы не на основании теории Максвелла, а из ряда побочных соображений. Во всяком случае, мы были бы вправе пожелать, чтобы Вашичек либо доказал, что формулы Мурмана противоречат теории Максвелла, либо, что его собственные формулы не противоречат этой теории. В статье же Вашичека [1] мы не находим ни того, ни другого; его заявление о том, что «... ревизия не касается основ теории Максвелла», не получает подтверждения. Вместо этого в статье говорится о двух принципах обратимости, но не дается никаких пояснений относительно связи этих принципов с теорией Максвелла.

2. Энергетическая проверка

Вашичек утверждает, что фазы в формулах Мурмана неверны и что это было доказано с помощью энергетической проверки. Однако, автор настоящей статьи достаточно подробно показал (см. [2]), что это не так. Формулы Мурмана полностью выдерживают энергетическую проверку. Ведь они правильно выведены из теории Максвелла, в которой закон сохранения энергии выполняется автоматически. Предложенные же Вашичком новые формулы оказываются, следовательно, лишенными достаточного основания.

3. Принцип обратимости

Вашичек вводит в рассмотрение два принципа обратимости, которые он связывает с именами Власова и Стокса. Однако, как будет показано ниже, Вашичек делает из принципа Стокса ошибочные выводы. Исправление же его ошибки вновь дает обычную теорию, включая формулы Мурмана.

В сущности, двух принципов обратимости нет, а есть только один принцип. То, что Вашичек называет принципом обратимости Власова, есть лишь частный случай более общего принципа, и из этого частного принципа Вашичек делает неправомерные выводы. Так, он полагает, что формулы Мурмана вытекают из принципа Власова. На самом же деле, как будет показано ниже, если выводить формулы Мурмана с помощью принципа обратимости, то для этого следует воспользоваться обобщенным принципом.

С Вашичком можно согласиться лишь в том, что необходимо изменять единый принцип обратимости. Но как его сформулировать? Очевидно, единый принцип обратимости должен вытекать из системы уравнений Максвелла. В частном случае, когда поглощающие среды отсутствуют, принцип обратимости хорошо известен; его можно найти, например, в цитируемой Вашичком книге А. А. Власова [4]. Едва ли правильно, однако, называть его, как это делает Вашичек, принципом Власова, так как он был известен и ранее. Состоит он в том, что в случае отсутствия поглощающих (проводящих) сред уравнения электродинамики Максвелла не изменяются при инверсии времени, $t \rightarrow -t$, если заменить $\mathbf{E} \rightarrow \mathbf{E}$, $\mathbf{H} \rightarrow -\mathbf{H}$, $q \rightarrow q$. В случае же наличия проводящих сред, благодаря присутствию члена $\sigma \mathbf{E}$, инвариантность уравнений нарушается.

В нашей проблеме мы имеем дело как раз с поглощающими слоями. Желая применить принцип обратимости в этой проблеме, мы должны обобщить его на случай наличия проводящих сред. Искомое обобщение мы получим, очевидно, путем добавления преобразования проводимости при инверсии времени, а именно: $\sigma \rightarrow -\sigma$. Уравнения Максвелла останутся тогда инвариантными.

Только таким образом, связывая вопрос об обратимости с инвариантностью системы уравнений Максвелла, имеет смысл вводить принцип обратимости. Правда, веществ с отрицательной проводимостью не существует, но этот факт означает лишь то, что электродинамические процессы в проводящих средах (например, распространение света в поглощающем веществе) необратимы. А формально мы имеем право вводить преобразование $\sigma \rightarrow -\sigma$ со всеми вытекающими отсюда следствиями.

Изменению знака проводимости соответствует в оптике переход от данных значений показателей преломления к комплексно-сопряженным значениям. Автор уже ранее [5] рассматривал многослойные оптические покрытия, у которых показатели преломления слоев (и, возможно, также ограничивающих сред) имеют комплексно-сопряженные значения. Они были названы сопряженными покрытиями, и все величины, относящиеся к ним, обозначались знаком \sim . Такого же обозначения мы будем придерживаться и здесь.

4. Основные формулы

Применим теперь метод Книттла [6] к выводу соотношений между амплитудными коэффициентами отражения r_R , r_L и пропускания t_R , t_L на любом покрытии. Вместо формул, выведенных Книттлом для частного случая непоглощающего покрытия, получим тогда следующие общие формулы (см. [7]):

$$r_R \tilde{r}_R^* + t_R \tilde{t}_L^* = 1 \quad (1)$$

$$r_R \tilde{t}_R^* + t_R \tilde{r}_L^* = 0, \quad (2)$$

откуда вытекает, что

$$r_L = - \frac{\tilde{r}_R^* t_R}{\tilde{t}_R^*} \quad (3)$$

и

$$t_L = \frac{1 - r_R \tilde{r}_R^*}{\tilde{t}_R^*}. \quad (4)$$

Эти формулы в несколько иной записи были выведены другим путем в цитированной выше работе [5]. А аналогичные формулы (17), (18), (20) и (21) Вашичека [1] верны только для непоглощающих покрытий.

5. Формула Мурмана

Применим формулы (3) и (4) к вычислению коэффициента отражения света на тонком металлическом слое, используя формулу (1) из статьи Вашичека [1]. Подстановка дает:

$$\Gamma_R = \frac{r'_R + \frac{r''_R t'_R}{\tilde{t}'_R} e^{-ix}}{1 + r'_R \frac{\tilde{r}'_R t'_R}{\tilde{t}'_R} e^{-ix}}. \quad (5)$$

Но так как $t'_R = \frac{2n_0}{n_1 + n_0}$, то $\tilde{t}'_R = t'_R$ и формула (5) превращается в формулу Мурмана:

$$\Gamma_R = \frac{r'_R + r''_R e^{-ix}}{1 + r'_R r''_R e^{-ix}}, \quad (6)$$

где

$$r''_R = -\tilde{r}_L'' = -\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}. \quad (7)$$

Таким образом, формула Мурмана получается не с помощью принципа обратимости Власова, как полагает Вашичек, а с помощью принципа обратимости, обобщенного на случай наличия поглощающих сред.

Отметим также, что и формулу Мурмана Вашичек применяет неправильно, именно в примере покрытия, состоящего из слоя диэлектрика и слоя металла. Формула (27) статьи Вашичека [1], вопреки его мнению, не согласуется с формулой Мурмана. Правильная формула такова:

$$r = \frac{r_1 + r''' \frac{t_1}{t_1'} e^{-ix_2}}{1 + r_1 r''' \frac{t_1}{t_1'} e^{-ix_2}}, \quad (8)$$

где r_1 дано в формуле (25) статьи Вашичека [1], а t_1 есть соответствующий коэффициент пропускания:

$$t_1 = \frac{t' t'' e^{-\frac{ix_1}{2}}}{1 + r' r'' e^{-ix_1}}. \quad (9)$$

Формула (8), кстати сказать, основана не столь на формуле Мурмана, сколь на общей формуле (см. формулу (1) в статье [1]), с учетом наших формул (1) — (4). Но она, конечно, согласуется и с формулой Мурмана.

6. Заключительные замечания

Мы должны остановиться здесь еще на некоторых утверждениях Вашичека, которые содержатся в последней части его статьи. Во-первых, Вашичек говорит: «Обе формулы (т. е. формула Мурмана и формула Вашичека. — П. К.) приводят к различным численным результатам, и лишь подробный анализ последних может решить, какая из формул верна». Это утверждение вводит совсем новую точку зрения. До сих пор вопрос решался чисто теоретически, и, по мнению автора настоящей статьи, выбор правильной формулы возможен на этом пути без привлечения численных данных. Правильной является просто та формула, которая вытекает из уравнений Максвелла и из подразумеваемого предположения, что металлический слой является однородным и изотропным и полностью характеризуется своим комплексным показателем преломления. Конечно, экспериментальные численные данные могут расходиться с теоретическими, но причину этого следует искать (как это обычно и делается) в том, что предположение об оптической однородности и изотропности слоя является неточным. Реальные слои имеют более сложную структуру, но в нашем спорном вопросе речь идет не о таких слоях. Поэтому ссылка Вашичека (пункт 4-й его выводов) на зависимость структуры слоя от толщины не относится к вопросу.

Во-вторых, неправильно связывать обсуждаемые формулы с тем, является ли слой сильно или слабо поглощающим. Основная формула (см. формулу (1) в статье Вашичека [1]) выводится обычно, правда, исходя из наглядной картины многократно отражающихся в слое лучей, но, как уже подчеркивалось [2], она от этого вывода не зависит и ее можно вывести непосредственно на основе граничных условий для векторов поля. Ничего общего не может иметь и принцип обратимости с тем, поглощает ли слой свет сильно или слабо. Странно звучит поэтому утверждение Вашичека о том, что его формула (24) верна только для слабо поглощающих слоев. На самом же деле, если только слой однороден и изотропен, единственно верна в данной проблеме формула Мурмана, и притом независимо от того, имеет ли слой сильную или слабую поглощающую способность.

В заключение автор считает своим долгом выразить уверенность в том, что вызванная воззрениями А. Вашичека научная дискуссия сыграла большую положительную роль в уяснении ряда тонких вопросов теории тонкослойных оптических покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Вашичек, К теории отражения света тонким металлическим слоем, Изв. АН Эст. ССР, Серия физ.-мат. и техн. наук, т. IX, № 3, 1960, 242.
2. П. Г. Кард, К теории отражения и пропускания света тонким металлическим слоем, Изв. АН Эст. ССР, Серия физ.-мат. и техн. наук, т. VII, № 4, 1958, 283.
3. H. Mürmann, Die optischen Konstanten durchsichtigen Silbers, Zs. f. Phys., **80**, 1933, 161.
4. А. А. Власов, Макроскопическая электродинамика, М., 1955, 40.
5. П. Г. Кард, Новые рекуррентные формулы в теории многослойных оптических покрытий, Оптика и спектроскопия, **9**, 1960, 95.
6. Z. Knittl, The Use of the Principle of Reversibility in Deriving Known Relations for a System of Optical Thin Films, Czechosl. Journ. Phys., **7**, 1957, 427.
7. П. Г. Кард, Оптический принцип обратимости и его применение в теории тонко-слойных покрытий, Оптика и спектроскопия, **11**, 1961, 237.

Тартуский
государственный университет

Поступила в редакцию
31. VIII 1960.

VEEL KORD A. VAŠÍČEK'I VALEMITEST

P. Kard,

Eesti NSV Teaduste Akadeemia korrespondeeriv liige

Resümee

Autori kritiseerivale artiklile [2] vastuseks kirjutatud artiklis [1] püüab Vašiček põhjendada oma teooriat uuel viisil, nimelt pööratavuse printsiibi abil. Seejuures aga jäävad kriitikas esiletoodud väited kummutamata, mistõttu püsib ka vastuolu Maxwell'i teooria ja Vašiček'i valemite vahel. Samuti ei pea endiselt paika Vašiček'i väide, et valgust neelavate optiliste katete teooria oma senisel kujul on vastuolus energia jäävuse seadusega. Teiselt poolt näidatakse artiklis, et Vašiček rakendab pööratavuse printsiipi ebaõigesti, mistõttu ka tema järeldused on ekslikud. Näidatakse, kuidas tuleb õigesti rakendada pööratavuse printsiipi. Antud formuleeringust tuleb näha Knittl'i meetodil [3] just need valemid, mida Vašiček püüab revideerida. Ühtlasi saadakse mitmekihiliste neelavate katete peegeldumise ja läbilaskuse koefitsientide vahelised põhiseosed, mis autor on juba varem ka teisel viisil tuletanud [5].

Tartu Riiklik Ülikool

Saabus toimetusse
31. VIII 1960

NOCHMALS ÜBER A. VAŠÍČEK'S FORMELN

P. Kard

Zusammenfassung

In seiner auf den kritischen Aufsatz [2] des Verfassers geschriebenen Antwort [1] ist Vašiček bestrebt, seine Theorie in neuer Weise, nämlich mit Hilfe des Reversibilitätsprinzips zu begründen. Dabei bleiben aber die im [2] dargelegten Ausführungen unwiderlegt. Dadurch ist auch der Widerspruch zwischen Maxwell's Theorie und Vašiček's Formeln stehengeblieben. Ebenso erweist sich als haltlos die Behauptung Vašiček's, dass die bisherige Theorie der lichtabsorbierenden optischen Schichtsysteme dem Gesetze der Erhaltung der Energie widerspreche. Andererseits wird es gezeigt, dass Vašiček das Reversibilitätsprinzip in unrichtiger Weise angewandt hat, weshalb auch seine Resultate irrtümlich sind. Es wird gezeigt, wie man das Reversibilitätsprinzip in richtiger Weise anzuwenden hat. Aus der gegebenen Fassung erhält man dann nach dem Verfahren Knittl's [3] genau dieselben Formeln, die Vašiček zu revidieren sucht. Zugleich erhält man die Grundbeziehungen zwischen den Reflexions- und Transmissionskoeffizienten der absorbierenden Mehrschichtsysteme, die vom Autor schon früher [5] in anderer Weise abgeleitet worden sind.

Staatsuniversität
zu Tartu

Eingegangen
am 31. Aug. 1960