Ladislav Dunajský
Fázové posuvy na rozhraniach

Matematicko-fyzikálny časopis, Vol. 11 (1961), No. 3, 203--207

Persistent URL: http://dml.cz/dmlcz/126687

MATEMATICKO-FYZIKÁLNY ČASOPIS SAV. 11, 3, 1961

FÁZOVÉ POSUVY NA ROZHRANIACH

LADISLAV DUNAJSKÝ, Nitra

Rozenberg vo svojej knihe [1] uvádza vzťahy pre amplitúdové pomery na rozhraní prvého a druhého prostredia v tvare:

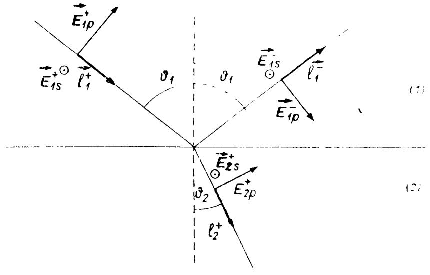
$$\boldsymbol{r}_{pp} = \frac{\boldsymbol{n}_1 \cos \boldsymbol{\vartheta}_2 - \boldsymbol{n}_2 \cos \boldsymbol{\vartheta}_1}{\boldsymbol{n}_1 \cos \boldsymbol{\vartheta}_2 + \boldsymbol{n}_2 \cos \boldsymbol{\vartheta}_1}, \tag{1}$$

$$\boldsymbol{r}_{ss} = \frac{\boldsymbol{n}_1 \cos \boldsymbol{\vartheta}_1 - \boldsymbol{n}_2 \cos \boldsymbol{\vartheta}_2}{\boldsymbol{n}_1 \cos \boldsymbol{\vartheta}_1 + \boldsymbol{n}_2 \cos \boldsymbol{\vartheta}_2}, \tag{2}$$

$$\boldsymbol{r}_{ss} = \boldsymbol{r}_{pp} = \frac{\boldsymbol{n}_1 - \boldsymbol{n}_2}{\boldsymbol{n}_1 + \boldsymbol{n}_2}. \tag{3}$$

Tu $\boldsymbol{n}_1$ a $\boldsymbol{n}_2$ sú príslušné komplexné indexy lomu, $\boldsymbol{\vartheta}_1$ komplexný uhol dopadu a $\boldsymbol{\vartheta}_2$ komplexný uhol lomu. Index $p(s)$ značí zložku rovnobežnú (kolmú) s rovinou dopadu. Komplexné veličiny či už skalárne, alebo vektorové sa píšu v tejto práci tučným písmenom a vektor sa značí šípkou nad príslušnou veličinou.

Ďalej píše: „Voľba znamienka v „týchto" vzorcoch podľa vzájomnej orientácie vektorov $\vec{\boldsymbol{E}}_{1p}^{+}$ a $\vec{\boldsymbol{E}}_{1p}^{-}$ na obr. „1" liši sa od zaužívanej voľby väčšine učebníc optiky a v mnohých originálnych prácach. Avšak toto je jedine dôsledné z teoretického hľadiska a úplne nevyhnutné, len čo ide o mnoholúčovú interferenciu pri absorpcii (t. j. komplexnom indexe lomu). Škľarevskij I. N. nedávno ukázal v [2], že experimentálne výsledky pri odraze svetla na rozhraní vzduch—striebro a ZnS—striebro jednoznačne vyžadujú (v medziach teórie mnoholúčovej interferencie) napísať Fresnelove vzorce práve v takom tvare, ako sú uvedené."



Obr. 1.

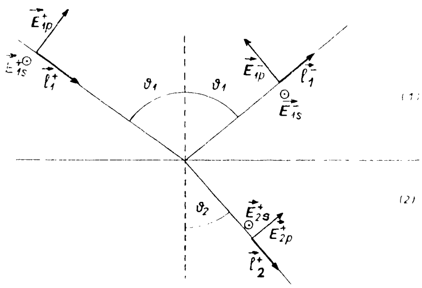
Predovšetkým treba poznamenať, že práca [2] týka sa len kolmého dopadu.

Námietky voči používaniu iných vzorcov ako (3) pre tento prípad vyvrátime neskôr. Najprv sa budeme zaoberať šikmým dopadom. Na obrázku 1 vidíme, že vektory $\vec{l}_1^+$, $\vec{E}_{1p}^+$, $\vec{E}_{1s}^+$ tvoria pravotočivý systém, ale vektory $\vec{l}_1^-$, $\vec{E}_{1p}^-$, $\vec{E}_{1s}^-$ ľavotočivý. Podľa našej mienky je výhodnejšie najmä vzhľadom na možnosť jednotného zápisu vzťahov medzi týmito vektormi pre dopadajúcu, odrazenú a lomenú vlnu voliť orientáciu príslušných vektorov tak, aby všetky tri trojice tvorili pravotočivý systém, ako je to na obr. 2. V tomto prípade dostaneme namiesto vzťahu (2) vzťah:

$$\boldsymbol{r}_{pp} = \frac{\boldsymbol{n}_2 \cos \vartheta_1 - \boldsymbol{n}_1 \cos \vartheta_2}{\boldsymbol{n}_2 \cos \vartheta_1 + \boldsymbol{n}_1 \cos \vartheta_2}, \tag{4}$$

ktorý sa uvádza napr. v práci [3] a [4].[1]

O určitých prednostiach oboch týchto možností píšu Jenkins a White v [5] a podrobne sa touto otázkou zaoberá Kravec v [6].



Obr. 2.

Z uvedeného vyplýva v súhlase s tým, čo píše Vašíček [7], že oba spôsoby voľby znamienka $\boldsymbol{r}_{pp}$ možno použiť, teda možno používať vzorec (1) alebo (4), len musíme dôsledne používať jeden z oboch vzorcov.

Prejdeme teraz ku skúmaniu kolmého dopadu homogénnej vlny. Tu ukážeme, že Rozenbergova a Škľarevského námietka voči používaniu iných vzorcov je neodôvodnená.

Predovšetkým si treba uvedomiť, že vlastne pri kolmom dopade homogénnej vlny nemá zmysel rozlišovať p a s, zložku vektorov elektromagnetického poľa. Pre všeobecne elipticky polarizované svetlo v tomto prípade platí vzťah:

$$\vec{\boldsymbol{E}}_1^+ = \boldsymbol{r}\vec{\boldsymbol{E}}_1^-, \tag{5}$$

kde

$$\boldsymbol{r} = r\,\mathrm{e}^{i\delta} = \frac{\boldsymbol{n}_1 - \boldsymbol{n}_2}{\boldsymbol{n}_1 + \boldsymbol{n}_2}. \tag{6}$$

Vidíme, že posledný vzťah je totožný so vzťahom (3).

Obvykle sa vzťahy (5) a (6) neodvodzujú priamo, ale tento prípad sa rieši limitným prechodom zo vzorcov (1) a (2), alebo (1) a (4) najčastejšie len pre lineárne polarizované svetlo. Takto dostaneme zo vzorca (1) a (2) vzťah (6) a z (4) vzťah:

$$\boldsymbol{r}' = r'\,\mathrm{e}^{i\delta'} = \frac{\boldsymbol{n}_2 - \boldsymbol{n}_1}{\boldsymbol{n}_2 + \boldsymbol{n}_2}. \tag{7}$$

---

[1]) V symbolike podľa práce [1].

Znamienko čitateľov vo vzorci (6) a (7) je opačné. V knihe [8] sa píše, že je to zrejmé protirečenie. Longhurst [9] zas píše, že výklad je jednoduchý, a podáva toto vysvetlenie:

Pri použití vzťahu (7) vlastne jednotkové vektory intenzity elektrického poľa dopadajúcej a odrazenej vlny sú opačného zmyslu, kým pri použití vzťahu (6) tieto vektory majú rovnaký zmysel. Tento výklad sa zhoduje s tým, čo sme uviedli prv o pravotočivosti a ľavotočivosti príslušnej trojice vektorov v prípade, ak uhol dopadu sa rovná nule.

Okrem dosiaľ uvedených vzťahov možno používať aj komplexne združené hodnoty oboch týchto vzťahov (porov. [10]).

Keď si uvedomíme tieto skutočnosti, neprekvapí nás, že pre fázový posuv v prípade kolmého dopadu homogénnej vlny dostávame rozličné hodnoty. Musíme, pravda, vždy používať dôsledne len také vzťahy, ktoré patria k sebe, a nesmieme ich pomiešať. Pri dôslednom zachovaní tejto zásady nemožno dôjsť k žiadnym protirečeniam s experimentálnymi výsledkami. Je ešte potrebné konkrétne ukázať, kde spočíva chyba niektorých Škľarevského úvah [2].

Škľarevskij v článku [2] vlastne používa vzťah (6), z ktorého pre rozhranie dielektrikum – kov vyplýva vzťah:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{2n_1\kappa_2}{n_1^2 - n_2^2 - \kappa_2^2}\,; \tag{8}$$

tu sme dosadili

$$\boldsymbol{n}_2 = n_2 - \boldsymbol{i}\kappa_2. \tag{9}$$

Pre rozhranie ZnS – Ag ($n_1 = 2{,}4$; $n_2 = 0{,}18$; $\kappa_2 = 3{,}67$) $\delta = 113°43'30''$; túto hodnotu Škľarevskij pre zjednodušenie ďalších výpočtov zaokrúhľuje na 120°.

Podmienka pre maximum pre prepustené svetlo vrstvou ZnS usadenou na striebre (zhora je vzduch) má tvar:*)

$$2n_1d_1 - \frac{\delta}{2\pi}\lambda = m\lambda \tag{10}$$

a pre prepustené svetlo vrstvou ZnS z dvoch strán postriebrenou platí vzťah:

$$2n_1d_1 - \frac{\delta}{\pi}\lambda = m\lambda. \tag{11}$$

Tu d_1 je hrúbka vrstvy a
m – interferenčný rád.

Zo vzorca (10) pre optickú hrúbku vyplýva ak $\delta = 120°$ vzťah:

$$n_1d_1 = \frac{3m + 1}{6}\lambda \tag{12}$$

*) Používame tu symboliku odlišnú od symboliky v článku [2].

a zo vzorca (11):

$$n_1 d_1 = \frac{3m + 2}{6} \lambda. \tag{13}$$

Z týchto vzťahov dostaneme tieto hodnoty pre $n_1 d_1$:

m	Vzduch – ZnS – Ag	Ag – ZnS – Ag
0	$1/6\,\lambda$	$2/6\,\lambda$
1	$4/6\,\lambda$	$5/6\,\lambda$
2	$7/6\,\lambda$	$8/6\,\lambda$

Dosiaľ naznačené úvahy Škľarevského sú správne a boli experimentálne overené. Nesprávnosť jeho úvah začína vtedy, keď sa domnieva, že vzorce (10) a (11) platia aj pre $\delta' = 300°$, $\delta^* = 240°$ a $\delta'^* = 60°$. Hviezdičkou sme označili fázové posuvy komplexne združených výrazov ku vzorcu (6) a (7). Škľarevskij uvádza namiesto $\delta' = 300°$ a $\delta^* = 240°$ uhly o 360° menšie, čo nemá vplyv na interferenčný obraz, len sa zmení interferenčný rád o jednotku.

Pri použití fázového posuvu δ' podľa vzťahu (7) si musíme uvedomiť, že kladný zmysel odrazenej vlny je opačný, ako vlny dopadajúcej. Preto okrem fázového posuvu δ' treba ešte uvažovať fázový posuv arc 180° = π a príslušné vzťahy budú tvaru:

$$2 n_1 d_1 - \frac{\delta' - \pi}{2\pi} \lambda = m\lambda, \tag{14}$$

$$2 n_1 d_1 - \frac{\delta' - \pi}{\pi} \lambda = m\lambda. \tag{15}$$

Z týchto vzťahov dostaneme vzťahy (12) a (13), teda rovnaké výsledky pre optickú hrúbku vrstvy. Ak použijeme δ^* a δ'^*, musíme do príslušných vzorcov (10) a (11), resp. (14) a (15) namiesto δ dosadiť $-\delta^*$, resp. namiesto δ' dosadiť $-\delta'^*$, lebo otáčanie príslušných rotujúcich komplexných vektorov (vektorových obrazov) v Gaussovej rovine sa deje opačným smerom. Takýmto spôsobom v každom prípade dostaneme rovnaké výsledky, ktoré sme uviedli v tabulke.*)

Záver

Ukázali sme, že pri dôslednom používaní žiadna z uvedených hodnôt fázového posuvu nevedie k protirečiacim si výsledkom. Tým sme vlastne vyvrátili Škľarevského názor v článku [2] a na tento článok sa opierajúcu Rozenbergovu mienku.

Za najopodstatnejší vzťah pre výpočet fázového posuvu treba, pravda, považovať vzťah (6).

---

*) Interferenčné rády majú, pravda, iné poradové čísla.

Poznámka pri odovzdaní do tlače

M. P. Lisica v recenzii Rozenbergovej knihy [1] v Opt. i spektr. IX (1960) 130 poukázal na to, že Rozenbergovo tvrdenie o uvažovanej otázke zostalo nedokázané. Škľarevskij a jeho kolektív v Opt. a spektr. IX (1960) 640 pripúšťa písanie vzorcov pre r_{pp} v tvare (1) aj (4) a považuje za správne aj dôsledky vyplývajúce z oboch týchto vzorcov pre kolmý dopad. O svojej mienke vyslovenej v [2] tu, pravda, Škľarevskij úplne mlčí.

LITERATÚRA

[1] Розенберг Г. В., *Оптика тонкослойных покрытий,* Москва 1958, 73.
[2] Шкляревский И. Н., ЖТФ 26 (1956), 333.
[3] Vašíček A., *Optika tenkých vrstev*, Praha 1956, 293.
[4] Vašíček A., *Optics of thin films*, Amsterdam 1960, 293.
[5] Jenkins F. A., White H. E., *Fundamentals of optics*, New York—Toronto—London 1957, 514.
[6] Кравец Т. П., *Труды по физике,* Москва—Ленинград 1959, 167—172.
[7] Vašíček A., *Optics of thin films*, Amsterdam 1960, 389.
[8] *Основные формулы физики,* Москва 1957, 358.
[9] Longhurst R. S., *Geometrical and Physical optics*, London—New York—Toronto 1957, 433.
[10] Stratton J. A., *Electromagnetic theory*, New York—London 1941, VII.

Došlo 28. 3. 1960.

Katedra fysiky
Přírodovědecké fakulty University J. E. Purkyně
v Brně
a
Katedra matematiky a fyziky
Vysokej školy poľnohospodárskej
v Nitre

ФАЗОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ НА ГРАНИЦАХ РАЗДЕЛА

Ладислав Дунайскы

Резюме

Показано, что при последовательном использовании, ни одна величина фазовых соотношений не ведет к противоречиям. Тем, в сущности, опровергается мнение Шкляревского, выраженное в статье [2] и мнение Розенберга, опирающееся на эту статью.

Самой подходящей формулой для вычисления фазовых соотнощений надо считать уравнение (6).

PHASE CHANGES ON THE BOUNDARY

Ladislav Dunajský

Summary

It is shown that by consistent using no of the given values of phase changes does not lead to contradictions. This contradicts, in fact, to Škľarevskij's opinion in the paper [2] and also to Rozenberg's opinion based on this paper.

The relation (6) is to be considered the most logical formula for calculating of phase change.