Časopis pro pěstování matematiky a fysiky

František Záviška
K teorii odrazu světla na kovech

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky, Vol. 60 (1931), No. 3, 172--175

Persistent URL: http://dml.cz/dmlcz/123943

K teorii odrazu světla na kovech.

F. Záviška.

(Došlo 27. října 1930.)

V dalším chci připojiti několik poznámek k práci J. Zahradníčka,[1]) v níž se autor zabývá teorií odrazu světla na kovech a stanovením optických konstant kovů.

V práci je nejdříve podáno — v podstatě podle přednášek zesnulého prof. Macků[2]) — řešení odrazu rovinné, lineárně polarisované a monochromatické vlny dopadající z isotropního, průhledného prostředí (vzduchu) na jiné prostředí také isotropní, ale pohlcující světlo (kov); obě prostředí jsou od sebe oddělena rovinným rozhraním. Metoda řešení je obvyklá; optický pohyb ve vlně dopadající, odražené i lomené vyhovuje Maxwellovým rovnicím, v rozhraní pak musí býti splněny podmínky, vyjadřující spojitost tangenčních složek elektrické a magnetické síly. Pro index lomu n kovu a pro jeho index absorpce k plynou odtud výrazy[3])

$$n^2 = \sin^2\varphi \left[1 + \frac{\operatorname{tg}^2\varphi\cos^2 2\psi}{(1+\sin 2\psi\cos\Delta)^2}\right] \tag{1}$$

$$k^2 = \frac{\operatorname{tg}^2\varphi\sin^2 2\psi\sin^2\Delta}{(1+\sin 2\psi\cos\Delta)^2 + \operatorname{tg}^2\varphi\cos^2 2\psi}. \tag{2}$$

Zde značí φ úhel dopadu, Δ je rozdíl mezi fází té složky odraženého kmitu, která je polarisována kolmo k rovině dopadu, a fází složky polarisované s rovinou dopadu rovnoběžně, dále je $\operatorname{tg}\psi = \operatorname{tg}\alpha^*/\operatorname{tg}\alpha$, kdež α^* a α jsou úhly mezi rovinou dopadu a polarisačními rovinami paprsku odraženého a dopadajícího. Všechny tyto úhly se dají přímo měřiti a podle svrchu uvedených vzorců lze pak vypočísti n a k.

---

[1]) J. Zahradníček: Odraz světla na kovech. Spisy vyd. přírodov. fak. Masarykovy univ., č. 127, 1930. ZS. f. Phys. 65, 814. 1930.

[2]) B. Macků: Elektromagnetické vlny, II. díl, str. 44, 1925 (litografie).

[3]) J. Zahradníček, l. cit. str. 7 a 8. Index absorpce k je tam označen k_M.

Index absorpce k je tu definován takto. Položme do dopadové roviny souřadnou rovinu $x = 0$, do rozhraní rovinu $z = 0$; osa $0z$, která je normálou rozhraní, nechť míří do absorbujícího prostředí (kovu). Pak je optický pohyb v tomto prostředí dán výrazy tvaru

$$Ae^{-\frac{2\pi}{\lambda}kz} \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{y \sin \varphi' + z \cos \varphi'}{v} + \varepsilon' \right),$$

kdež T značí periodu kmitu, v fázovou rychlost lomené vlny, $\lambda = vT$ její délku, φ' úhel lomu. Amplituda tohoto pohybu je

$$Ae^{-\frac{2\pi}{\lambda}kz};$$

místa stejných amplitud jsou tedy roviny rovnoběžné s rozhraním a na dráze λ zeslabí se absorpcí kmitová amplituda v poměru $e^{-2\pi k}$. Definice indexu n je obvyklá, je totiž

$$n = \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi'} = \frac{c}{v};$$

φ značí úhel dopadu a c je rychlost světla v prostředí, z něhož světlo dopadá. S elektromagnetickými konstantami absorbující látky ε' a σ' (pro dosti dlouhé vlny je ε' dielektrická konstanta, σ' konstanta vodivosti) souvisí n a k rovnicemi

$$\begin{aligned} n^2(1 - k^2) &= \varepsilon' \\ n^2 k \cos \varphi' &= \sigma' T; \end{aligned} \tag{3}$$

při tom předpokládáme, že dielektrická konstanta druhého prostředí (průhledného) je rovna jedné.

Rovnice rovin stejné fáze je

$$y \sin \varphi' + z \cos \varphi' = \text{konst.};$$

jejich normála svírá s normálou rovin stejné amplitudy (normálou absorpční) úhel φ'. Je-li φ' rozdílné od nuly, mají roviny stejné fáze jinou polohu než roviny stejné amplitudy; takové vlny se nazývají nehomogenní. Jen při kolmém dopadu je $\varphi' = 0$ a lomená vlna je homogenní.

Vzorce (1) a (2) nejsou v podstatě nové,[4]) zpravidla se ovšem neuvádějí explicitně z důvodu, který vysvitne z dalšího. Zahradníček srovnává s nimi vzorce, které dostal Drude pro index lomu a index absorpce. Drude je odvodil metodou, které užil již Cauchy; vyšel totiž z Fresnelových výrazů pro amplitudu vlny odražené na isotropním a průhledném prostředí, vyloučil z nich úhel lomu φ' Snelliovým vzorcem $\sin \varphi / \sin \varphi' = n$ a místo reálného indexu

---

[4]) Viz na př. Geiger-Scheel: Handbuch der Physik, sv. 20, 1928, str. 241 a další. Rovnice (1) pro n plyne ihned z rovnic (156) na str. 243 a (160) na str. 244, jen označení je poněkud jiné.

lomu n zavedl index komplexní; reálná jeho část je vlastní index lomu, část imaginární souvisí s absorpcí. Tato metoda dává pro index lomu a index absorpce jiné hodnoty než rovnice (1) a (2) a Zahradníček praví o Drudeových vzorcích toto:[5]) „Tak zvané obecné vzorce Drudeovy pro optické konstanty kovů — a ovšem tím spíše vzorce přibližné — nevystihují přesně daného případu odrazu světla na kovech, leda jen v prvním přiblížení." A na jiném místě[6]) praví Zahradníček, že Drude pokládal hodnoty n a k pro hlavní úhel dopadu a hlavní azimut za optické konstanty materiálu.

Tato tvrzení nejsou správná. Drudeovy vzorce jsou právě tak přesné jako vzorce (1) a (2); že se od nich liší, souvisí jednoduše s tím, že se týkají jiných veličin. Lomená vlna v absorbujícím prostředí je totiž, pokud nejde o kolmý dopad, nehomogenní; o takových vlnách dokázal již Ketteler,[7]) že jejich fázová rychlost v a index absorpce k závisí na úhlu mezi fázovou normálou a normálou absorpční; v našem případě je to úhel φ'. Poněvadž je $n = c/v$, znamená to, že veličiny n a k dané rovnicemi (1) a (2) jsou funkce úhlu lomu φ' a tím i úhlu dopadu φ. Je to ostatně i přímo patrné z rovnic (3), v nichž veličiny ε', σ' a T jsou na směru nezávislé.

Proto nelze n a k pokládati za optické konstanty absorbujícího prostředí; za ty se béře index lomu n_0 a index absorpce k_0 *homogenních* vln, které vznikají při kolmém dopadu. A *těchto* veličin se týkají Drudeovy vzorce. Vztahy mezi optickými konstantami n_0 a k_0 na jedné straně a mezi proměnlivým indexem lomu n a proměnlivým indexem absorpce k na straně druhé plynou z rovnic (3); je totiž

$$n_0^2\,(1 - k_0^2) = n^2(1 - k^2) = \varepsilon'$$
$$n_0^2 k_0 = n^2 k \cos\varphi' = \sigma' T.$$

Odtud snadno vypočteme

$$n_0^2 = \frac{n^2}{2}\left(\sqrt{A^2 + B^2} + A\right)$$

$$k_0 = \frac{1}{B}\left(\sqrt{A^2 + B^2} - A\right),$$

kdež

$$A = 1 - k^2 \qquad\qquad B = 2k\cos\varphi'.$$

Dosadíme-li sem za n a k výrazy (1) a (2) a dále

$$\cos^2\varphi' = \frac{\operatorname{tg}^2\varphi\cos^2 2\psi}{(1 + \sin 2\psi\cos\Delta)^2 + \operatorname{tg}^2\varphi\cos 2^2\psi},$$

[5]) l. c. str. 14.
[6]) l. c. str. 10.
[7]) E. Ketteler: Theoretische Optik. Braunschweig 1885. pag. 126.

dostaneme pro n_0 a k_0 výrazy, které se liší jen formální úpravou od Drudeových vzorců. Počet nebudeme prováděti, neboť Drudeovy vzorce[8]) jsou značně složitější než výrazy (1) a (2). Je to pochopitelné; vyjadřují totiž index lomu a index absorpce, příslušný kolmému dopadu, veličinami, které se stanoví měřením při libovolném dopadovém úhlu.

Zahradníček uvádí v citované práci i výsledky měření optických konstant krystalů PbS a ZnS pro žlutou čáru heliovou. Z čísel jím vypočtených zasluhují ovšem tohoto názvu jen hodnoty n_0 a k_0 stanovené podle Drudeových vzorců a uváděné pod záhlavím „Drude"; čísla pod záhlavím „Macků" jsou proměnlivé indexy n a k vypočtené z rovnic (1) a (2). Závislost indexu lomu n na dopadovém úhlu je u obou zkoumaných látek nepatrná; je tomu tak u všech absorbujících prostředí, jež mají vysoký index lomu. Hodnoty n_0 a k_0 vypočtené podle Drudeových vzorců z měření vykonaných při různých dopadových úhlech nevycházejí konstantní, jak teorie žádá, nýbrž kolísají a to někdy dosti značně (na př. index lomu n_0 ZnS kolísá mezi 2·00 a 2·13). Snad je to způsobeno povrchovými vrstvami nebo nepřesností měření, ale usuzovati z toho na nedokonalost teorie bylo by, myslím, předčasné.

*

Sur la théorie de la réflexion de la lumière sur les métaux.

(Extrait de l'article précédent.)

L'auteur fait voir que les objections faites par M. Zahradníček*) contre les formules de Drude pour l'indice de réfraction et pour l'indice d'absorption des métaux, ne sont pas fondées.

---

[8]) Jsou podrobně uvedeny v citovaném již kompendiu Geiger-Scheelově, sv. 20, pag. 245. Za index absorpce je tam vzata veličina $k \cos \varphi'$. Viz též P. Drude, Ann. d. Phys. 64, 161, 1898.

*) J. Zahradníček: „Odraz světla na kovech." Publications de la Faculté des Sciences de l'Université Masaryk. No 127, Brno 1930.