

Kapitola 1

Úvod

Prostředí, jehož vlastnosti jsou konstantní v každé rovině kolmé na pevnou osu se nazývá *vrstevnaté prostředí*. Tuto osu položíme do osy z kartézského systému. Potom pro izotropní prostředí charakterizované elektrickou permitivitou ε a magnetickou permeabilitou μ máme

$$\varepsilon = \varepsilon(z) , \quad \mu = \mu(z) . \quad (1.0.1)$$

Budeme uvažovat šíření rovinné elektromagnetické vlny harmonické v čase (monochromatické s úhlovou frekvencí ω) tímto vrstevnatým prostředím. Jedná se o nejjednodušší případ nehomogenního prostředí [4].

Teorie vrstevnatých prostředí je v optice významná zejména v souvislosti s multivrstvami, tj. sekvencemi plan-paralelních vrstev. Mají užitečná využití. Například je lze použít jako antireflexní vrstvy, tj. jako povlaky, které redukují reflektivitu optické plochy. Nebo naopak, podmínky lze nastavit tak, aby došlo, např. na skleněném povrchu, ke zvýšení reflektivity. To se využívá v děliči optického svazku (tzv. *beam splitter*). Multivrstvy lze také použít jako interferenční filtry nebo polarizátory. Využívají se v optických prvcích pro rtg. oblast.

Výpočet multivrstev požadovaných optických vlastností pro pevnou vlnovou délku a pevně zvolený úhel dopadu je poměrně jednoduchá úloha. Současné teoretické i technologické postupy umožňují realizace multivrstev, které mají předem požadované parametry v širokém oboru frekvencí (např. v celé viditelné oblasti spektra) a v širokém intervalu úhlů dopadu. Další rozšíření funkcí se dosahuje náhradou soustavy homogenních vrstev multivrstvami složenými z difrakčních mřížek.

V první kapitole se zabýváme klasickou úlohou o interferenci rovinných vln v izotropní a homogenní tenké vrstvě obklopené dvěma izotropními homogenními poloprostory [1]. Získáme Airyho formule pro odraz a průchod. Navíc nalezneme podmínku pro vedení vln v dielektrické vrstvě a podmínku pro šíření povrchových plasmonů rozhraním izotropního dielektrika a prostředí s negativní a reálnou permitivitou. Následuje jednoduchá maticová metoda umožňující rozšíření na libovolný počet vrstev. K pochopení stačí znalost řešení vlnové rovnice ve tvaru rovinných vln a Fresnelových rovnic pro odraz a průchod vln na jednoduchém rozhraní dvou izotropních homogenních prostředí. Hlavním výsledkem jsou dvě matice 2×2 charakterizující jednoduché *rozhraní* pro vlny s TE a TM polarizací a jedna diagonální

matice tvořená exponenciálními faktory charakterizující šíření rovinných vln uvnitř dané vrstvy. Multivrstva je pak charakterizována vhodně uspořádaným součinem těchto matic rozhraní a šíření. Znalost tohoto jednoduchého maticového formalizmu je postačující pro řešení velkého počtu pro praxi zajímavých úloh.

Druhá kapitola je věnována originální Abelèsově teorii [2, 3]. šíření elektromagnetických vln v izotropním vrstevnatém prostředí, tj. v prostředí, v němž se elektromagnetické materiálové parametry, $\varepsilon(z)$ a $\mu(z)$ opět mění pouze ve směru jediné osy, kterou jsme již zvolili ve směru osy z . Změna těchto parametrů nemusí být skoková, jak tomu bylo u multivrstev v předešlé kapitole, ale může být popsána nějakou spojitou funkcí. Teorii vychází z Maxwellových rovnic a využívá z nich plynoucích okrajových podmínek. Předpoklad o spojitě proměnných $\varepsilon(z)$ a $\mu(z)$ neobyčejně komplikuje úlohu, takže v případech, kdy je možno skutečný profil nahradit stupňovým (multivrstevnatá aproximace) se volí tento jako snazší přístup. Aproximace skutečného profilu, profilem po úsecích spojitým (tedy nikoliv konstantním) může mít nicméně v některých případech oprávnění. Například umožňuje lépe vystihnout reálný profil menším počtem úseků (vrstev). Tento přístup je ilustrován na profilu s lineárně proměnnou elektrickou permitivitou $\varepsilon(z)$ při konstantní magnetické permeabilitě μ , nebo s lineárně proměnnou magnetickou permeabilitou $\mu(z)$ a konstantní elektrickou permitivitou ε . Úloha vede k Besselově rovnici s řešením neceločíselného řádu. V případě stupňového profilu lze Abelèsovu charakteristickou matici rozštěpit na součin tří matic: matici levého rozhraní, diagonální matici šíření a matici pravého rozhraní. Tím se dostáváme k pojmu matice přenosu definované jako součin matice pravého rozhraní předchozí vrstvy $(n - 1)$ v posloupnosti, matice levého rozhraní vrstvy n a diagonální matice šíření vrstvy n . Hlavním výsledkem Abelèsovy teorie jsou charakteristické matice 2×2 pro každou z dvou vlastních polarizací, TE a TM, které lze kombinovat do kvazidiagonální charakteristické matice 4×4 . Nediagonální matice 2×2 jsou v izotropních prostředích nulové.

Abelèsovu teorii rozšířil Berreman [5]. na anizotropní multivrstevnatá prostředí, v nichž jsou tyto nediagonální matice 2×2 obecně nenulové. Třetí kapitola je věnována elektromagnetickým vlnám v anizotropních multivrstvách. Každá z vrstev je charakterizována konstantním tensorem permitivity [6]. Z odpovídající vlnové rovnice dané vrstvy plynou čtyři vlastní vektory šíření a čtyři vlastní polarizace. Multivrstva je charakterizována součinem matic přenosu [6, 7].

Rokushima [8] Abelèsovu a Berremanovu teorii zobecnil na multivrstevnaté anizotropní difrakční mřížky charakterizované maticemi $4n \times 4n$, kde n závisí na potřebném počtu členů Fourierova rozvoje k popisu periodického tensoru elektrické permitivity (při skalární magnetické permeabilitě) nebo k popisu periodického tensoru magnetické permeability (při skalární elektrické permitivitě) a na počtu zahrnutých difrakčních řádů elektrických a magnetických polí. Těmto multivrstevnatým anizotropním difrakčním mřížkám je věnována kapitola čtvrtá.

Literatura ke kapitole 1

- [1] R. M. A. Azzam, N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light* (Elsevier, Amsterdam, 1987)
- [2] F. Abelès, “Recherches sur la propagation des ondes électromagnétiques sinusoïdales dans les milieux stratifiés. Application aux couches minces,” *Ann. Phys. Paris* **5**, 596–640 (1950),
- [3] Max Born & Emil Wolf with contributions by A. B. Bhatia, P. C. Clemmow, D. Gabor, A. R. Stokes, A. M. Taylor, P. A. Wayman and W. L. Wilcock: *Principles of Optics, Electromagnetic Theory of Propagation Interference and Diffraction of Light*, Sixth (Corrected) Edition, Cambridge University Press 1997.
- [4] Weng Cho Chew, *Waves and Fields in Inhomogeneous Media*, (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York 1995). R. Wangsness, *Electromagnetic Fields*, (J. Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1986).
- [5] D. W. Berreman, “Optics in Stratified and Anisotropic Media: 4×4 -Matrix Formulation,” *J. Opt. Soc. Am.* **62**, 502–510, 1972; D. W. Berreman, “Optics in Smoothly Varying Anisotropic Planar Structures: Application to Liquid-Crystal Twist Cells,” *J. Opt. Soc. Am.* **63**, 1374–1380, 1973
- [6] P. Yeh, *J. Opt. Soc. Am.* **69**, 742–756, 1979; “Optics of anisotropic layered media: a new 4×4 matrix algebra,” *Surf. Sci.* **96**, 41–53, 1980
- [7] Š. Višňovský, *Optics in magnetic multilayers and nanostructures*, Taylor and Francis 2006
- [8] K. Rokushima and J. Yamakita, “Analysis of anisotropic dielectric gratings,” *J. Opt. Soc. Am.* **73**, 901–908, 1983 Reprinted in *Selected papers on Diffraction Gratings*, D. Maystre, Editor, Brian J. Thompson, General Editor, SPIE Milestone Series, Volume MS **83** (1993), pp. 519–526, SPIE Optical Engineering Press.