

负折射率半透明薄膜的热发射特性研究

黄勇, 崔焱, 王浚

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘要:根据传输矩阵法和基尔霍夫定律研究了负折射率薄膜的热发射特性. 较为系统地考察了相关参数对热辐射 s 偏振波的影响. 研究结果表明, 负折射率材料的热发射率随角频率的变化呈现复杂的振荡现象. 同时也发现, 它的发射率峰值有时在远离法线的区域.

关键词:发射率; 负折射率; 薄膜; 相干性

中图分类号:TK124; O435 **文献标识码:**A

THERMAL EMISSION CHARACTERISTICS OF A NEGATIVE INDEX SEMITRANSSPARENT THIN FILM

HUANG Yong, CUI Yi, WANG Jun

(School of Aeronautical Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Thermal emission characteristics of a negative index semitransparent thin film were studied based on transmit matrix method and Kirchhoff radiation law. The influence of different parameters on the emissivity of s-polarization wave was studied. The results show that a complicated oscillation will happen when the angular frequency increases. It also shows that the peak value of the emissivity is sometimes far away from the normal direction.

Key words: emissivity; negative index; thin film; coherence

引言

薄膜作为一种重要的光学材料, 广泛用于各个领域, 其相关的光学和红外特性研究受到研究者的重视^[1-5]. 薄膜材料通常被认为对于入射光是不吸收的介质, 即透明介质. 但对于一些半导体薄膜或金属薄膜材料在一定谱段是半透明的, 热环境中需要考虑它自身的发射和吸收. 研究吸收性薄膜的热辐射特性对于现代工业和科学研究有重要意义^[3-5]. 宏观尺度下半透明材料热辐射特性的研究依赖于对热辐射传递方程的求解, 其本质是能量守恒定律和几何光学原理, 不考虑热辐射的干涉效应. 但对于薄膜热辐射特性的研究则需要根据波动光学理论进行求解.

负折射率材料是一种新型的人工材料. 1968年, 前苏联科学家 Veselago 提出理论上存在负折射率材料. 当光波从正折射率材料入射到负折射率材料的界面时, 光波的折射与常规折射相反, 入射波和折射波处在界面法线方向同一侧. 在这种材料中, 电

场、磁场和波矢方向遵守左手法则, 而不是常规材料所遵循的右手法则, 所以又被人们称为左手材料. 2001年, 美国加州大学圣地亚哥分校的 Smith 等人第一次构造出介电常数 ϵ 与导磁率 μ 同时为负的人工介质, 并通过实验观察到了“负折射”现象^[6]. 从此这类人工材料及其应用引起人们极大的关注^[7]. 初期的负折射率材料研究集中在微波波段. 经过各国科学家的努力, 现在已能构造近红外和可见光波段的负折射率材料^[8,9]. 负折射率材料具有良好的控制光的特性的功能. 可以预计, 负折射率薄膜将在红外隐身领域发挥重要的作用^[10].

负折射率薄膜的光学传输计算同样依赖于经典的波动光学理论. 目前负折射率薄膜的光学参数较为缺乏, 负折射率薄膜的红外特性研究很少. 本文将根据已知的色散关系对负折射率薄膜的热辐射特性进行研究, 获得对负折射率薄膜热辐射特性的定量认识. 本文研究热辐射的 s 偏振波的发射特性.

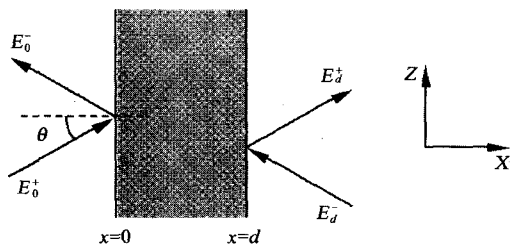


图1 物理模型
Fig.1 Physical model

1 物理模型

如图1所示,温度为 T_f 、厚度为 d 的薄膜置于真空环境中,其相对介电常数为 ε 、相对磁导率为 μ 。一单色平面电磁波 $E_0^+ = A_1 \exp[i\omega t - i(k_x x + k_z z)]$ 从 $x=0$ 界面射入薄膜层,入射角为 θ 。 $x=0$ 处外表面左向的电磁波为 $E_0^- = B_1 \exp[i\omega t + i(k_x x - k_z z)]$; $x=d$ 处外表面右向的电磁波为 $E_d^+ = A_2 \exp[i\omega t - ik_x(x-d) - ik_z z]$; $x=d$ 处外表面左向的电磁波为 $E_d^- = B_2 \exp[i\omega t + ik_x(x-d) - ik_z z]$ 。 ω 为电磁波的角频率; k_x 、 k_z 为波矢在 x 和 z 方向的分量; A_1 、 B_1 、 A_2 和 B_2 为各电磁波的幅值。根据文献[11],可以得到,对于 s 偏振波,各幅值之间的关系为

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} &= \mathbf{M} \begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ k_x & -k_x \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \frac{k'_x}{\mu} & -\frac{k'_x}{\mu} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{ik'_x d} & 0 \\ 0 & e^{-ik'_x d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix}, \quad (1) \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \frac{k'_x}{\mu} & -\frac{k'_x}{\mu} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ k_x & -k_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

式中, k'_x 是薄膜中波矢在 x 方向的分量, $k_x'^2 + k_z^2 = \varepsilon \mu \omega^2 / c^2$ 。由于 B_2 等于0,可以得到薄膜对于入射平面电磁波的透射因子 t 和反射因子 r 分别为

$$t = A_2 / A_1 = 1 / M_{11}, \quad (2)$$

$$r = B_1 / A_1 = M_{21} / M_{11}, \quad (3)$$

因此可以得到薄膜对于入射电磁波的透射率 T 和反射率 R 分别为

$$T = tt^* = \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2, \quad R = rr^* = \left| \frac{M_{21}}{M_{11}} \right|^2. \quad (4)$$

根据基尔霍夫定律可以知道薄膜的发射率等于它的吸收率,所以薄膜的发射率 E 为

$$E = 1 - T - R. \quad (5)$$

2 计算结果与分析

2.1 负折射率介质的物性参数

负折射率介质的介电常数、磁导率与入射光的角频率存在内在的关系,对于由金属网栅与开口谐振环组成的负折射率材料,其相对介电常数和磁导率的色散关系为^[12]

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma_e \omega}, \quad (6)$$

$$\mu = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\gamma_m \omega}, \quad (7)$$

式中, ω 是单色平面电磁波的角频率, ω_p 、 ω_0 是材料的有效等离子体频率和有效谐振频率, γ_e 、 γ_m 为阻尼项, F 是每个小单元中开口谐振环所占据的面积。

根据以上两式,入射光频率 ω 取值应在 ω_0 与 ω_p 之间,且 γ_m / ω_p 、 γ_e / ω_p 比值趋近0。本文取值为^[13]: $\omega_0 = 0.5\omega_p$, $F = 0.785$, $\gamma_m = \gamma_e = \gamma = 0.0025\omega_p$ 。经过这样处理,物性参数 ε 、 μ 仅与无量纲的角频率 ω / ω_p 有关。此外,对于负折射率材料,必须满足 $0.5 < \omega / \omega_p < 1$ 。

2.2 发射率随 ω / ω_p 的变化情况

图2是不同厚度下,薄膜的发射率随角频率 ω 变化的计算结果,发射角 θ 取 0° 、 45° 和 89° 三个参数。从计算结果可以看出,当 $\theta = 0^\circ$ 时,薄膜厚度对发射率随 ω 变化的规律影响较小。随着薄膜厚度的增加,发射率的数值总体上逐渐增加。当薄膜厚度增加到 $10\lambda_p$ 时(λ_p 为 ω_p 所对应的波长),发射率随 ω 变化产生一定的振荡。在 $\theta = 0^\circ$ 角度,薄膜层在 $\omega / \omega_p = 0.51$ 附近出现发射率的峰值。

$\theta = 45^\circ$ 时,薄膜发射率出现两处峰值。一处出现在 $\omega / \omega_p = 0.51 \sim 0.54$ 附近,随着薄膜厚度的增加,峰值右移;另一处峰值出现在 $\omega / \omega_p = 0.7$ 附近, $d / \lambda_p = 0.1$ 时不明显,但随着薄膜厚度的增加,峰值也在增大。在 $0.5 < \omega / \omega_p < 0.7$ 范围内,薄膜厚度越大,薄膜发射率越高。但在 $0.8 < \omega / \omega_p < 1.0$ 范围内,发射率随薄膜厚度及 ω / ω_p 变化都不大,接近0。

$\theta = 89^\circ$ 时,由于传输矩阵接近奇异,发射率在 $0.5 < \omega / \omega_p < 0.7$ 之间发生剧烈振荡,而且随着薄膜厚度的增加,振荡的频率越高,但峰值明显在衰减;在 $\omega / \omega_p > 0.7$ 范围内,薄膜的发射率也接近0。

2.3 发射率随 θ 的变化情况

图3是两种不同厚度下,不同 ω / ω_p 时,薄膜发射率随角度的变化规律。从计算结果可以看出,发射率随角度变化的总的趋势是先平缓增加然后急剧下降。但对于 $\omega / \omega_p = 0.6$ 的情况,在薄膜层较厚时出现了多峰值的结果。一般来说,常规尺度下,采用几

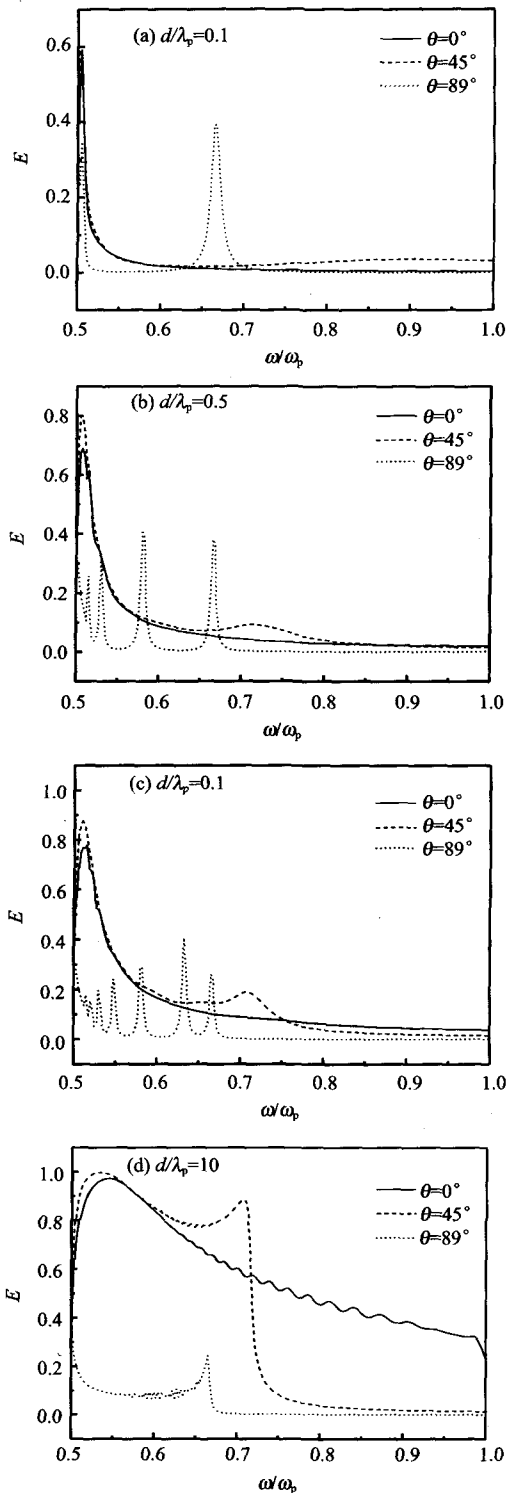


图2 不同角频率下发射率的特征
Fig.2 Emissivity characteristics at different angular frequencies

何光学研究半透明材料的表观发射率时,发现其呈现准各向同性的特点,法线方向的发射率较大,在接近 90°方向很小.但对于薄膜材料,由于考虑波动光学效应,它的热辐射会出现随波长和角度变化的峰

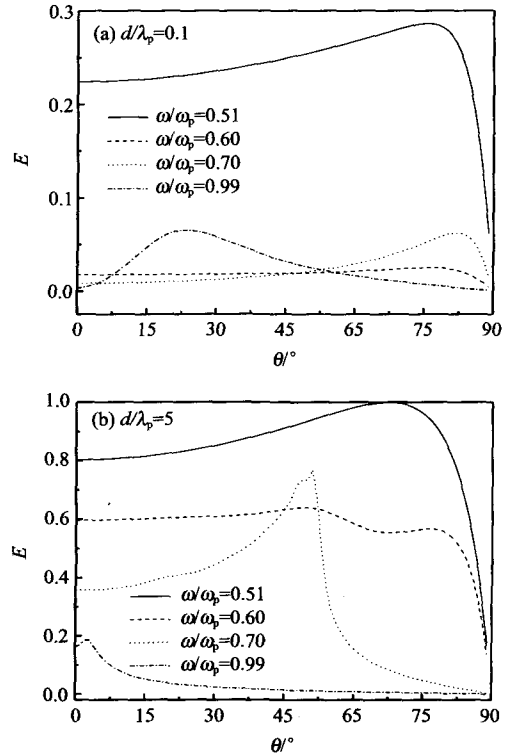


图3 发射率随方向变化的特征
Fig.3 Emissivity characteristics at different directions

值.法线方向通常不是发射率的峰值方向,并且有时热发射率的峰值远离法线方向,并且有些情况下比法线方向的发射率大很多^[3,4].对于负折射率薄膜材料,这种情况依然存在.例如,在图 3(b)中,ω/ωp = 0.7 时,其发射率峰值在 50°附近,并且该峰值发射率约为法线方向发射率的 2 倍.在图 3(a)中,ω/ωp 时,其发射率峰值在 80°附近.

2.4 发射率随薄膜厚度变化情况

图 4 是不同角度下,负折射率薄膜的发射率随厚度的变化规律.发射角 θ 选取了 0°、30°、60° 和 89° 4 个有代表性的角度,无量纲角频率依次取 0.51、0.60、0.70 和 0.99.

对比 4 幅图可以看出,接近水平方向 89°时,薄膜的发射率随厚度出现振荡,但随着厚度的增加振幅越来越小直到趋于稳定,当 ω/ωp > 0.7 时,发射率接近零.由图可以看出,当 ω/ωp 小于某一值时,薄膜发射率随其厚度的增厚而逐渐增大直至趋于某一稳定的值,而且 ω/ωp 越小达到稳定的薄膜厚度也越薄,稳定时的发射率也越大.当 ω/ωp = 0.51 且发射角远离水平方向时,稳定的发射率大于 0.8,且当入射角为 60°时,约为 0.98,接近黑体的发射率.

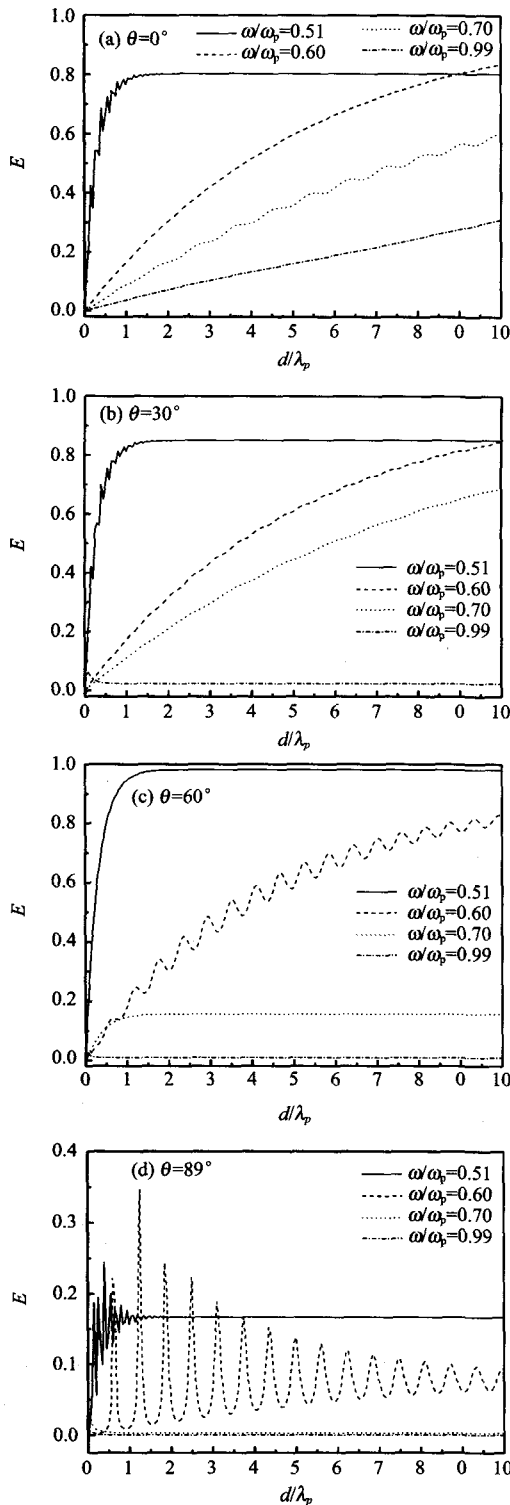


图4 不同厚度时发射率的特征

Fig.4 Emissivity characteristics at different thickness

3 结语

根据传输矩阵法和基尔霍夫定律,研究了负折射率薄膜的热发射特性.把负折射率材料相对介电

常数和相对导磁率的色散关系引入负折射率半透明薄膜的研究中.通过较为系统的研究,考察了相关参数对热辐射 s 偏振波的影响.

计算结果表明,由于薄膜结构和负折射率材料固有的色散关系,其热发射特性明显区别于常规尺度的半透明材料.对负折射率薄膜 s 偏振波的研究表明,它的热发射率随角频率的变化呈现复杂的震荡现象,同时也发现,它的发射率峰值大多情况下不在法线方向,有时在远离法线的区域.这些均表明在微尺度条件下,干涉效应对热发射有显著影响.

REFERENCES

- [1] QIN Su-Mei, TONG Zi-Yang, GUO Ming, *et al.* Effect of rapid thermal annealing on property of nano-SnO₂ thin film [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (秦苏梅, 童梓洋, 邓红梅, 等. 快速热退火对纳米晶粒 SnO₂ 薄膜性质的影响. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(2): 101—104.
- [2] LIU Ai-Yun, XUE Jian-Qiang, HOU Yun, *et al.* Optical characteristics of PMNT thin film in visible and mid-infrared regions [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘爱云, 薛建强, 侯云, 等. PMNT 薄膜可见-红外光学性质的研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(6): 405—408.
- [3] Liang X G, Han M H. Coherent thermal radiation in thin films and its application in the emissivity design of multilayer films [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2007, **52**(10): 1426—1431.
- [4] Liang X G, Han M H. Experimental study on coherence of thermal radiation of thin film structures [J]. *Chinese Physics Letters*, 2006, **23**(5): 1219—1221.
- [5] Ben Abdallah P. Thermal antenna behavior for thin-film structures [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(7): 1368—1371.
- [6] Shelby R A, Smith D R, Schutz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 77—79.
- [7] CHENG Jian, XU Shan-Jia. Analysis of filter characteristics for a new type of dielectric grating waveguide based on left-handed materials [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (程健, 徐善驾. 一种新型左手介质栅波导滤波特性的分析. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(1): 31—35.
- [8] Shalaev V M, Cai W S, Chettiar U K, *et al.* Negative index of refraction in optical metamaterials [J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(24): 3356—3358.
- [9] Grigorenko A N, Geim A K, Gleason H F, *et al.* Nanofabricated media with negative permeability at visible frequencies [J]. *Nature*, 2005, **438**(7066): 335—338.
- [10] Cho A. Physics: Voila! Cloak of invisibility unveiled [J]. *Science*, 2006, **314**(5798): 403—403.
- [11] Yeh P. *Optical Waves in Layered Media* [M]. Wiley, New York, 1988, 1—30.
- [12] Smith D R, Kroll N E. Negative refractive index in left-handed materials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**: 2933—2936.
- [13] Fu C J. Radiative properties of emerging materials and radiative heat transfer at the nanoscale [D]. Georgia Institute of Technology, 2004, 26—56.