

·光电器件与材料·

二维光子晶体的热辐射控制

戴峭峰

(华南师范大学信息光电子科技学院 光子信息技术广东省教育厅重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要:采用传输矩阵方法研究了二维光子晶体的热辐射性质. 研究发现对于完整光子晶体, 在反射带内的热辐射很弱. 但通过改变光子晶体表层空气柱的半径, 可以调控反射带内的热辐射谱, 使得对应于部分波长的热辐射显著变大. 这种热辐射的变化源于光子晶体表面模的激发.

关键词:光子晶体; 传输矩阵; 热辐射; 吸收

中图分类号: O734

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)02-0035-03

Thermal Emission Control with Two-Dimensional Photonic Crystals

DAI Qiao-feng

(Laboratory of Photonic Information Technology, School for Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The thermal emissions of two-dimensional photonic crystals are researched with transfer matrix method. The thermal emission in stop band is generally weak for a perfect photonic crystal. As the radii of air holes in surface layer are changed, the thermal emission is adjusted accordingly. In some wavelengths, the thermal emission is become greatly big. Such kind of modification of thermal emission is originated from the excitation of surface mode.

Key words: photonic crystal; transfer matrix; thermal emission; absorption

自从 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 于 1987 年首次提出光子晶体的概念之后, 这种新材料的独特性质就吸引了众多研究者的极大兴趣. 光子晶体是由 2 种或 2 种以上不同介电材料在空间按照一定方式排列所组成的一种周期结构. 与半导体中由于原子的周期性排列所形成的电子能隙类似, 电磁波在介电常数周期性排列的光子晶体中传播时具有光子带隙, 即特定频率范围的电磁波不能在光子晶体中传播. 三维光子晶体由于可以在三维方向上控制光束的传播, 因此成为最为理想的光学器件. 但是三维光子晶体的实验制备方法较为复杂, 尤其是很难控制晶体缺陷的位置和尺寸. 相比较而言, 由于可以采用现有成熟的微电子加工技术, 二维光子晶体的制备

就容易得多.

温度高于绝对零度的物体都存在热辐射. 热辐射及其光谱控制在热光电能转换技术、节能技术以及激光技术等诸多领域有着重要的应用背景, 是一个重要的研究方向. 通常材料的热辐射及其光谱依赖于材料自身属性. 近年来, 研究人员在不断探索新型的、更有效的热辐射光谱控制方法. 最近, 利用光子晶体来控制热辐射引起了人们的极大兴趣^[3-6]. 其中, 利用光子晶体控制热辐射可以提高热光电转化的转化效率^[3], 利用光子晶体还可以设计红外窄带光源^[4,5], 以及提高白炽灯的发光效率^[6]. 同时, 根据基尔霍夫定律, 体材料热辐射的发射率和材料的吸收率相等. 目前已经证明, 这一定律对于具有空

收稿日期: 2009-01-30

基金项目: 国家自然科学基金(60908040); 教育部博士点基金(20094407120011); 广东省自然科学基金(9451063101002256)

作者简介: 戴峭峰(1976-), 男, 湖南武冈人, 博士, 讲师. 主要从事微、纳光学方面的研究.

间周期结构的光子晶体依然适用^[7,8]. 这为热辐射的计算提供了理论依据.

文中采用了传输矩阵方法计算了二维光子晶体的热辐射(即吸收率). 对于完整晶体, 在反射带内的热辐射率很低. 而当光子晶体最外层的空气柱半径改变时, 部分波长对应的热辐射率显著变大, 甚至可以达到 99%.

1 理论计算方法

采用二维传输矩阵方法^[9,10](TMM)计算热辐射率(吸收率). 一维传输矩阵方法被广泛用于计算光学薄膜的透射率、反射率以及吸收率等光学性质.

$$\begin{bmatrix} E_x(r+c) \\ E_y(r+c) \\ H'_x(r+c) \\ H'_y(r+c) \end{bmatrix} = \sum_{r'} \begin{bmatrix} T_{11}(r, r') T_{12}(r, r') T_{13}(r, r') T_{14}(r, r') \\ T_{21}(r, r') T_{22}(r, r') T_{23}(r, r') T_{24}(r, r') \\ T_{31}(r, r') T_{32}(r, r') T_{33}(r, r') T_{34}(r, r') \\ T_{41}(r, r') T_{42}(r, r') T_{43}(r, r') T_{44}(r, r') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(r') \\ E_y(r') \\ H'_x(r') \\ H'_y(r') \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, c 是介质层的厚度. 如果给定介质层的其中一面的电磁场, 就可以根据矩阵 T 得出另一面的电磁场. 当研究对象具有无限的横截面, 且在 x 和 y 方向上具有周期性, 可以用 Bloch 定理来处理 xy 平面的边界. 经过一系列的推导, 最后传输矩阵 T 通过表象变换变为平面波基矢上的表示

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} t^{++} - t^{+-} (t^{--})^{-1} t^{-+} & t^{+-} (t^{--})^{-1} \\ - (t^{--})^{-1} t^{-+} & (t^{--})^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{T}_{++} & \tilde{T}_{+-} \\ \tilde{T}_{-+} & \tilde{T}_{--} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, t^{++} 和 t^{-+} 是介质层左边的反射和透射矩阵; t^{--} 和 t^{+-} 是介质层右边的透射和反射矩阵. 这样就可以得到光子晶体的反射率 R 和透射率 T . 最后, 得到吸收率

$$A = 1 - T - R \quad (3)$$

由于基尔霍夫定律依然适用于光子晶体的热辐射^[7,8], 其热辐射率等于吸收率 A .

2 计算结果及讨论

研究一种二维空气柱光子晶体, 它可以通过在一块高折射率基底材料上打孔得到. 其晶体结构(如图 1 所示)为正方晶格, 其中黑色代表基底材料, 白色代表空气. 光子晶体的晶格常数为 a ; r 为光子晶体里层空气柱子的半径; r_s 为最外层空气柱子的半

径. 二维传输矩阵的原理与一维类似, 先是将体系分层, 每层介质左右两边的电磁场通过一个矩阵联系, 每层介质的折射率分布、厚度决定了该介质层的传输矩阵, 在保持数值稳定的前提下将各层之间的矩阵按顺序乘起来就可以得到整个结构两边的电磁场之间的关系. 从而得到透射率、反射率以及吸收率. 不同之处在于二维光子晶体在横向存在周期性, 决定了光波在横向上是 Bloch 波, 从而在每层介质的两边光波都会包含有高阶平面波. 与一维传输矩阵相比, 每个介质层的传输矩阵将变得复杂.

在 (k, ω) 空间, 介质层两边电磁场之间的关系可以用传输矩阵 T 来定义^[9,10]

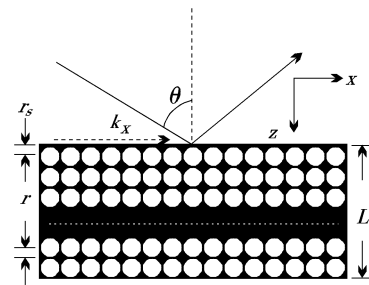


图 1 二维光子晶体结构示意图

径; 光子晶体沿 z 方向的长度为 L ; ϵ_0 和 ϵ 分别是空气和基底材料的介电函数; θ 是入射角; k_x 为入射光波矢量沿着 x 方向的投影. 首先, 研究完整光子晶体(即表层和里层空气柱半径相等)的热辐射率(吸收率), 设 $r = r_s = 0.5a$, $L = 10a$, $\epsilon_0 = 1.0$ 和 $\epsilon = 11.56 + 0.1i$ 分别对应于空气和硅的介电函数, 其中硅在近红外区的微弱吸收用介电函数的虚部表示. 对于入射方介质折射率为 n_0 的光子晶体, 入射光为传播模的条件是 $k_x < n_0 \omega / c$. 由于 TM 波(电场矢量平行于柱子)和 TE 波(磁场矢量平行于柱子)的吸收性质比较相似, 以下将以 TM 波为研究的例子. 利用传输矩阵方法可以计算得到复反射系数, 从而得到反射率. 图 2 用准三维图表示 TM 波反射率随频率 ω 和波矢分量 k_x 的变化关系, 灰度表示反射率. 在图 2 中, 用 2 条点线描出了反射带的边界, 其间的反射率大于 99.9%. 右下角黑色区域内 ($k_x > n_0 \omega / c$) 表示入射光为非传播模, 故设置这区

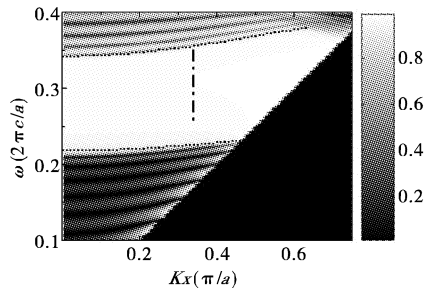


图 2 TM 波反射率随频率 ω 和波矢分量 k_x 的变化关系
域内反射率为 0. 图 2 中点划线表示 $k_x a/\pi = 0.34$, $0.25 < \omega a/2\pi c < 0.35$ 的区间, 从图 2 可知此区间完全在反射带内. 通过已经计算得到的反射率以及透射率, 可以计算得到式(3)所表述的吸收率, 即热辐射率. 图 3a 用准三维图表示了 TM 波吸收率随频率 ω 和波矢分量 k_x 的变化关系, 灰度表示吸收率. 可以看到在两虚线标示的反射带内, 吸收率比较小.

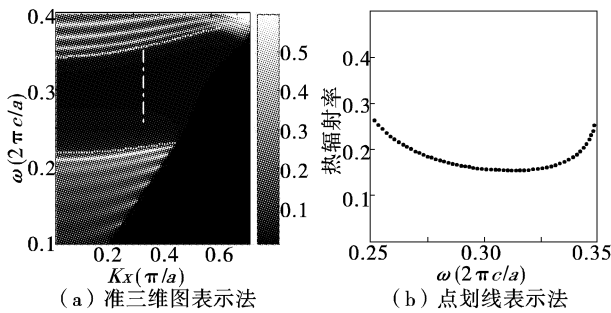


图 3 热辐射率(吸收率)随频率 ω 和波矢分量 k_x 的变化关系

为了更直观地表述其大小, 图 3b 画出了图 3a 中点划线所示区间的吸收率随 ω 的变化关系. 可见, 在反射带内的此区间, 吸收率小于 3%. 接下来, 研究当表层空气柱的半径改变时对热辐射率的影响. 在其余参数相同的条件下, 改变 $r_s = 0.2 a$, 相应热辐射率(吸收率)由图 4 描述. 其中, 图 4a 用准三维图表示热辐射率(吸收率)随频率 ω 和波矢分量 k_x 的变化关系, 灰度表示热辐射率(吸收率). 从图 4 中可以看到, 虽然在反射带内的大部分区域, 热辐射率(吸收率)依然很小, 但是在一些区域的热辐射率明显变大. 图 4b 表示图 4a 中点划线区间 ($k_x a/\pi = 0.34, 0.25 < \omega a/2\pi c < 0.35$) 的热辐射率. 从图 4b 中可以看到, 在辐射谱中出现了几个很高的辐射峰. 对应于频率 $\omega a/2\pi c = 0.285$, 热辐射率可以达到 99.4%. 这也与完整光子晶体的热辐射率, 即图 3b 形成明显的对比. 而二者结构的不同之处仅仅在于最外层空气柱的半径不同.

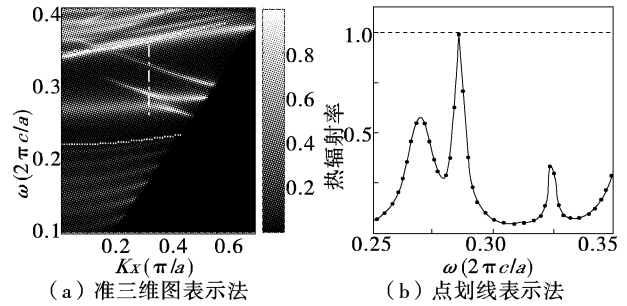


图 4 热辐射率(吸收率)随频率 ω 和波矢分量 k_x 的变化关系

当改变光子晶体表层的空气孔半径时, 在光子反射带中会出现表面态. 表面态为一种局域在表层的倏逝波, 沿着表层传播. 当入射光传播到光子晶体表面, 可以激发出表面态, 部分能量转化为倏逝波沿着光子晶体表面传播, 这部分能量被光子晶体吸收, 并产生较大的热辐射. 通过修饰光子晶体表面可以调控热辐射谱, 这一性质可用于提高热光伏电池和白炽灯的效率, 以及窄带红外光源的设计.

3 结 束 语

采用传输矩阵方法研究了二维光子晶体的热辐射性质. 对于完整晶体, 在反射带内的热辐射通常都很弱. 但通过改变二维光子晶体表层空气柱的半径, 可以调控反射带内的热辐射谱, 使得对应于部分波长的热辐射显著变大, 文中对这种调控的机制进行了解释.

参 考 文 献

- [1] Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics[J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58(20):2059-2062.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58(23):2486-2489.
- [3] Lin S Y, Moreno J, Fleming J G. Three-dimensional photonic-crystal emitter for thermal photovoltaic power generation[J]. Appl. Phys. Lett., 2003, 83(2):380-382.
- [4] Tsai Ming-Wei, Chuang Tzu-Hung, Meng Chao-Yu, et al. High performance midinfrared narrow-band plasmonic thermal emitter[J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 89(17): 173116(1-3).

(下转第 41 页)

激发强度的反电势所需要积累的壁电荷就越多,那么对主放电阶段进行的放电时间的要求就越长,而这个放电时间正是由脉冲频率所决定的.从图 5 可以看出,当频率在 9.6 kHz 激发时,平板电光源的发光亮度达到最高,而其消耗的功率却变化不大.

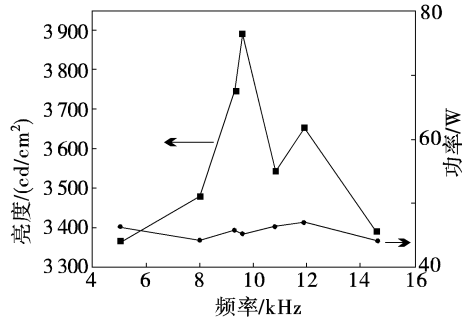


图 5 复合电极型平板背光源在不同频率下的亮度和功率值

2.4 发光均匀性

对制作的无极背光源进行表面 6 点亮度测试,结果显示,发光均匀性都超过 92%.与传统的 CCFL 荧光灯需要增加导光膜不同的是,该平板荧光灯可直接作为 LCD 背光源来使用.

3 结 论

利用复合电极薄膜代替液体水膜的简捷工艺制备了一种 LCD 平板背光源,使其发光亮度达 4 000 cd/m²,发光均匀度大于 92%,另外,如果采用导电能力更强的透明固体电解质作为电极,还可进一步优化平板电光源的发光特性,从而应用于 LCD 背光

显示和绿色照明领域.

参考文献

- [1] 王琼华,成建波,杨刚.透反液晶显示器[J].液晶与显示,2004,19(6):446-449.
- [2] 徐杰,杨虹,郭树旭,等.TFT-LCD 周边驱动电路集成化设计[J].液晶与显示,2004,19(1):42-46.
- [3] 赵申苓.液晶显示器背光源驱动优化的探讨[J].液晶与显示,2006,21(2):165-168.
- [4] 刘敬伟,王刚,马丽,等.大尺寸液晶电视用 LED 背光源的设计与制作[J].液晶与显示,2006,21(5):539-544.
- [5] 季旭东.LCD 背光源产品的新发展[J].液晶与显示,2002,17(2):119-127.
- [6] 胡文波,张华.平面介质阻挡 Xe 放电荧光灯型 LCD 背光源的新进展[J].液晶与显示,2005,20(6):532-538.
- [7] Iimer M, Lecheler R, Schweizer H, et al. Hg-free flat panel light source PLANON-a promising candidate for future LCD back-lights [C]//SID'00 Digest, 2000:931-933.
- [8] Frank V, Lothar H, Simon J. Discharge lamp for dielectrically impeded discharges with improved electrode configuration:美国,US6411039[P]. 2002-06-25.
- [9] Lothar H, Frank V. Discharge lamp for dielectrically impeded discharges with a arrangement of support elements:美国,US2002163296[P]. 2002-11-07.
- [10] 王奇观,李建平,王素敏,等.新型无极 LCD 平板背光源[J].液晶与显示,2007,22(04):412-416.
- [11] 王奇观,李建平,王素敏.无电极型平面介质阻挡放电荧光灯及其制作方法:CN200710018181.0[P]. 2010-2-17.

(上接第 37 页)

- [5] Biswas R, Zhou D, Puscasu I, et al. Sharp thermal emission and absorption from conformally coated metallic photonic crystal with triangular lattice [J]. Appl. Phys. Lett., 2008, 93(6):063307(1-3).
- [6] John Sajeev, Wang Rongzhou. Metallic photonic-band-gap filament architectures for optimized incandescent lighting[J]. Phys. Rev. A, 2008, 78(4):043809(1-10).
- [7] Luo C, Narayanaswamy A, Chen G, et al. Thermal Radiation from Photonic Crystals: A Direct Calculation[J]. Phys. Rev. Lett., 2004, 93(21):213905(1-4).

- [8] Chan David L C, Soljačić Marin, Joannopoulos J D. Direct calculation of thermal emission for three-dimensionally periodic photonic crystal slabs [J]. Phys. Rev. E, 2006, 74(3):036615(1-9).
- [9] Bell P M, Pendry J B, Moreno L M, et al. A program for calculating photonic band structures and transmission coefficients of complex structures [J]. Computer Physics Communications, 1995, 85(2):306-322.
- [10] Pendry J B, Mackinnon A. Calculation of photon dispersion relations [J]. Phys. Rev. Lett., 1992, 69(19):2772-2775.