

中长波红外双波段全向反射镜的设计

赵大鹏, 时家明, 汪家春, 袁忠才, 刘必臻

(电子工程学院安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要:研究了异质结构一维光子晶体全向反射镜的设计方法。通过分析光子晶体的晶格常数、折射比和填充比,选择碲和聚乙烯设计了中红外和远红外双波段全向反射镜。结果表明采用异质结构的光子晶体能够同时在 $3.4 \sim 5.4 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 实现全向反射(反射率大于99%),相对带宽分别达到了49.8%和43.1%。

关键词:全向反射镜;光子晶体;异质结构;中远红外

中图分类号:TN214

文献标识码:A

Design on a Dual-band Omnidirectional Reflector of MWIR and LWIR

ZHAO Da-peng, SHI Jia-ming, WANG Jia-chun, YUAN Zhong-cai, LIU Bi-liu

(Key Lab of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: An omnidirectional reflector based on 1D photonic crystal of heterostructures is introduced. The lattice constant, refraction ratio and filling factor are analyzed firstly. Then a dual-band omnidirectional reflector of MWIR and LWIR is designed using Te and polyethylene. The result shows that the photonic crystal based on heterostructures can achieve omnidirectional reflection in $3.4 \sim 5.4 \mu\text{m}$ and $8 \sim 12.5 \mu\text{m}$ band in the mean while, whose bandwidth can reach 49.8% and 43.1% respectively.

Key words: omnidirectional reflector; photonic crystal; heterostructure; MWIR and LWIR

1 引言

光子晶体^[1-2]凭借其材料结构的周期性,可以禁止光在特定频谱范围(光子带隙)内传播。Y Fink, D. N. Chigrin 等人^[3-6]的研究表明,对一维光子晶体而言,存在着全向光子带隙,在该带隙内的光不管从哪个方向入射到光子晶体上都将发生完全反射。利用这一特性,已经研制出了可见光^[7]、近红外^[8]、中红外^[4]和中远红外双波段^[9]光子晶体全向反射镜,其中 B. Temelkuran 等人研究的全向反射镜利用光子晶体的两个带隙首次在 $4.5 \sim 5.5 \mu\text{m}$ 和

$8 \sim 12 \mu\text{m}$ 两个红外大气窗口上实现了全反射。为进一步拓展频带,本文采用异质结构^[10-11]设计了中远红外双波段全向反射镜,可以在 $3.4 \sim 5.4 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 两个波段上同时实现任意偏振波的全向反射。

基金项目:安徽省重点实验室基金项目(No. 2007A005005E)资助。

作者简介:赵大鹏(1979-),男,在读博士,主要从事红外系统及功能材料设计方面的研究工作。E-mail: zhaodapeng@126.com

收稿日期:2007-10-25

2 光子晶体计算模型

设所研究的光子晶体模型如图1所示。图中波长为 λ 的电磁波以角度 θ_0 入射到光子晶体上,在光子晶体材料的左边是折射率为 n_0 的媒质(通常为空气),右边覆于折射率为 n_{k+1} 的基底材料上。光子晶体的组成材料周期性排列,如果光子晶体由高低折射率为 n_H 和 n_L 的两种材料组成,则有:

$$\begin{cases} n_1 = n_3 = n_5 = \dots = n_H \\ n_2 = n_4 = n_6 = \dots = n_L \\ d_1 = d_3 = d_5 = \dots = d_H \\ d_2 = d_4 = d_6 = \dots = d_L \end{cases}$$

其中, d_H 和 d_L 分别为高折射率和低折射率两种组成材料的厚度。

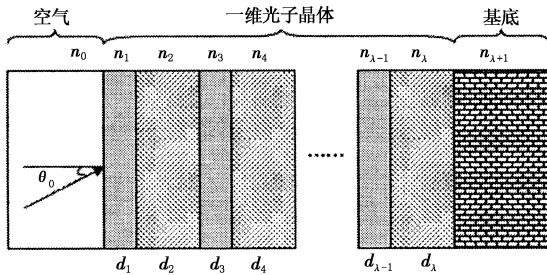


图1 一维光子晶体模型

Fig.1 the model of 1D photonic crystal

图1所示的模型可以用矩阵光学理论进行计算^[12]。根据矩阵光学理论,第 l 层媒质的干涉矩阵可以表示为:

$$M_l = \begin{bmatrix} \cos\delta_l & j \frac{\sin\delta_l}{\eta_l} \\ j\eta_l \sin\delta_l & \cos\delta_l \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\delta_l = \frac{2\pi}{\lambda} n_l d_l \cos\theta_l$, n_l , d_l 分别为第 l 层媒质的折

射率和厚度; $\eta_l = \begin{cases} n_l / \cos\theta_l, \text{TM波} \\ n_l \cos\theta_l, \text{TE波} \end{cases}$, θ_l 为第 l 层媒质

中的折射角,它满足 Snell 折射定律,即 $n_l \sin\theta_l = n_{l-1} \sin\theta_{l-1} = \dots = n_0 \sin\theta_0$ 。

光子晶体由第1层到第 k 的材料组成,其总的干涉矩阵可以表示为:

$$M = \prod_{l=1}^k M_l \quad (2)$$

干涉矩阵 M 是一个 2×2 矩阵,不妨记为:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由此可得反射率 R :

$$R = \left| \frac{m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} - \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})}{m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} + \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})} \right|^2 \quad (4)$$

透射率 T 为:

$$T = \frac{4 |\eta_{k+1} / \eta_0|}{|m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} + \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})|^2} \quad (5)$$

吸收率 A 为:

$$A = 1 - R - T \quad (6)$$

3 相关参数的确定

本文的目的是设计在中红外和远红外波段均具有全向反射能力的一维光子晶体反射镜,为此需要确定如下相关参数。

3.1 晶格常数

光子晶体的晶格常数 $a = d_H + d_L$,它是光子晶体最小单元的尺寸。为方便设计,可以使用晶格常数将波长和厚度进行归一化,使得:

$$\begin{aligned} \delta_l &= \frac{2\pi}{\lambda} n_l d_l \cos\theta_l = 2\pi \frac{a}{\lambda} n_l \frac{d_l}{a} \cos\theta_l \\ &= 2\pi \kappa n_l t_l \cos\theta_l \end{aligned} \quad (7)$$

这里 $\kappa = \frac{a}{\lambda}$ 为归一化频率; $t_l = \frac{d_l}{a}$ 为归一化厚度。

从式(7)可以看出,等比缩放 a 和 λ 对 δ_l 的大小没有影响,从而对 R 和 T 也没有影响,这就是光子晶体的标度定律(scaling law)^[13],利用这一点可以仅仅通过改变 a 的大小将同一光子晶体模型(只是 a 不同)应用于不同频段上。换句话说, a 的大小决定了光子带隙的位置。而光子带隙的宽度则由组成一维光子晶体两种材料的折射比 n_H/n_L 和填充比 d_H/d_L 决定。

3.2 折射比和填充比

对光子晶体而言,较大的折射率比能够获得较宽的光子带隙。考虑到反射率 $R = 1 - T - A$,为使反射率达到100%,所选材料还需在中远红外波段透明(无吸收),为此选取折射率为4.6的碲和折射率为1.5的聚乙烯^[9]进行光子晶体设计。

折射比已知后,可以确定填充比。研究表明^[14],填充比 d_H/d_L 取比 n_L/n_H 稍大一点的值可以获得最宽的光子带隙。实际上,在设计初期可以简单的令 $d_H/d_L = n_L/n_H$,待设计初步完成时再进一步优化 d_H/d_L 的取值。

3.3 相对带宽

为评价光子带隙的宽度引入相对带宽的概念。相对带宽 $\Delta\omega$ 定义为波段上下限频率之差和中心频率的商为:

$$\begin{aligned}\Delta\omega &= \frac{|\omega_2 - \omega_1|}{(\omega_2 + \omega_1)/2} \\ &= \frac{|\kappa_2 - \kappa_1|}{(\kappa_2 + \kappa_1)/2} = \frac{|\lambda_2 - \lambda_1|}{(\lambda_2 + \lambda_1)/2}\end{aligned}\quad (8)$$

由式(8)可得中红外波段的相对带宽为:

$$\Delta\omega_{3-5} = \frac{13-5}{(3+5)/2} = 50\%$$

远红外波段的相对带宽为:

$$\Delta\omega_{8-12} = \frac{18-12}{(8+12)/2} = 40\%$$

图2所示为使用干涉矩阵法计算的光子晶体的反射率情况。此处的光子晶体由9层碲和聚乙烯交替排列组成,折射率比 $n_H/n_L = 3.07$,填充比 $d_H/d_L = n_L/n_H = 0.326$,基底材料为碲,厚度也为 d_H 。

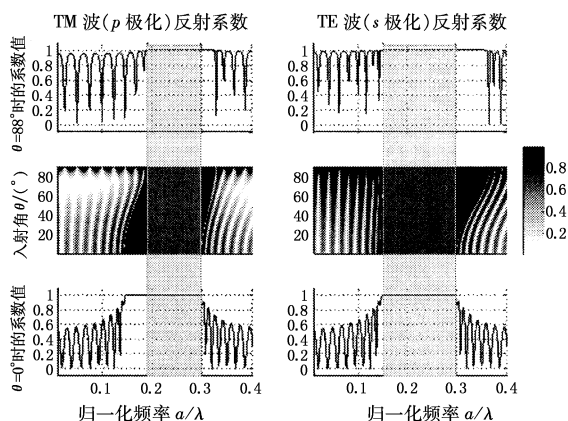


图2 光子晶体的反射特性

Fig.2 reflectivity of the photonic crystal

图2由6个子图形组成,左边一列的三个图为TM波入射时的反射特性,右边三个图为TE波入射时的反射特性;下排和上排的四图分别表示入射角 0° 和 88° 时的反射曲线,横轴为归一化频率,纵轴为反射率值;中排的图为带隙图,横轴为归一化频率,纵轴为入射角,用灰度值表示反射率的大小,黑色代表反射率为1,白色代表反射率为0,阴影部分标出的是光子带隙,其上的反射率均大于99%。

从图2可以看到TM波入射时光子带隙的上下限为0.296和0.19,相对带宽为43.6%;TE波入射时光子带隙的上下限为0.296和0.15,相对带宽为

65.5%。这样的带宽能够满足中红外和远红外的要求。

4 中远红外双波段光子晶体

为使光子晶体在中远红外波段同时呈现全向反射特性,可以首先利用标度定律通过缩放晶格常数改变光子带隙的位置,然后采用异质结构^[10-11]将不同晶格常数的光子晶体叠加起来构造成双波段光子晶体。这种方法设计的光子晶体如图3所示,它由18层碲和聚乙烯交替排列组成,折射率比 $n_H/n_L = 3.07$,左边9层的晶格常数为 $2.425a$,右边9层的晶格常数为 $a = d_H + d_L$,基底由碲构成,厚度为 d_H 。

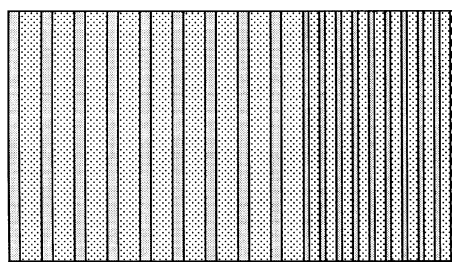


图3 异质结构光子晶体模型

Fig.3 the model of heterostructure photonic crystal

首先看填充比 $d_H/d_L = n_L/n_H = 0.326$ 时异质结构光子晶体的反射特性。如图4所示,当TM波入射时第一条光子带隙的上下限为0.126和0.082,相对带宽为42.3%,第二条光子带隙的上下限为0.312和0.188,相对带宽为49.6%;当TE波入射时第一条光子带隙的上下限为0.126和0.064,相对带宽为65.3%,第二条光子带隙的上下限为0.312和0.152,相对带宽为70%。

如果晶格常数取为 $1\mu\text{m}$,同时考虑到碲的透明波段为 $3.4 \sim 20\mu\text{m}$,则TM波入射时在 $3.4 \sim 5.3\mu\text{m}$ 和 $7.9 \sim 12.2\mu\text{m}$ 两个波段的全向反射率均大于99%,TE波入射时在 $3.4 \sim 6.6\mu\text{m}$ 和 $7.9 \sim 15.6\mu\text{m}$ 两个波段的全向反射率均大于99%。

为进一步拓展相对带宽,可以令填充比稍大一些,取 $d_H/d_L = n_L/n_H + 0.027 = 0.353$ 时,可以得到图5所示的反射特性。从图中可以看到,当TM波入射时第一条光子带隙的上下限为0.124和0.08,相对带宽为43.1%,第二条光子带隙的上下限为0.306和0.184,相对带宽为49.8%;当TE波入射时第一条光子带隙的上下限为0.124和0.064,相对带宽为63.8%,第二条光子带隙的上下限为0.306和0.148,相对带宽为69.6%。

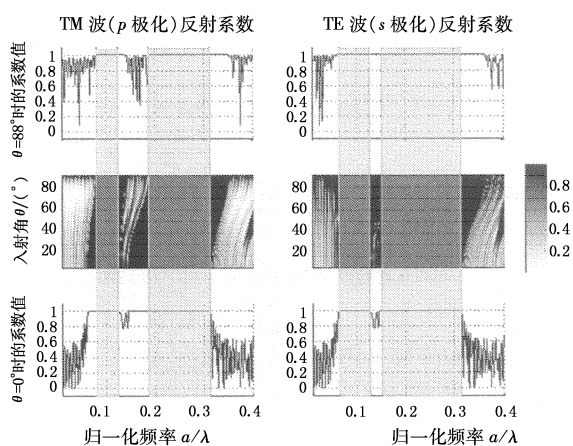


图4 光子晶体的反射特性

Fig.4 reflectivity of the photonic crystal

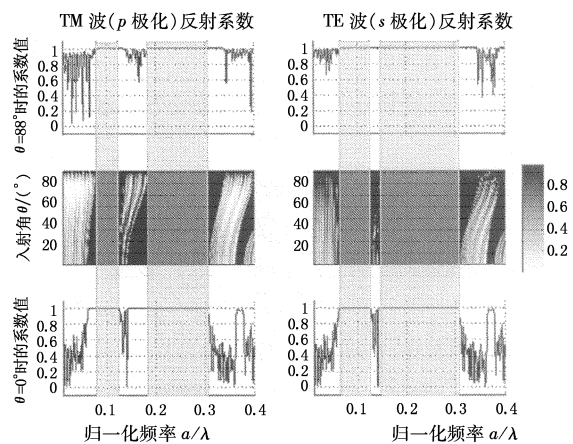


图5 光子晶体的反射特性

Fig.5 reflectivity of the photonic crystal

同样取晶格常数为 $1\mu\text{m}$, 则 TM 波入射时在 $3.4 \sim 5.4\mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12.5\mu\text{m}$ 两个波段的全向反射率均大于 99%, TE 波入射时在 $3.4 \sim 6.8\mu\text{m}$ 和 $8 \sim 15.6\mu\text{m}$ 两个波段的全向反射率均大于 99%。

5 结束语

本文采用异质结构方法设计了由碲和聚乙烯材料组成的中远红外双波段光子晶体, 与 B. Temelkuran 等人采用同种材料设计的光子晶体相比具有更宽的光子带隙, 在 $3.4 \sim 5.3\mu\text{m}$ 和 $7.9 \sim 12.2\mu\text{m}$ 两个波段实现了对任意偏振态的全向反射, 相对带宽分别为 49.6% 和 42.3%。通过进一步改进材料的填充比本文将全向反射的波段拓展为 $3.4 \sim 5.4\mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12.5\mu\text{m}$, 相对带宽分别达到 49.8% 和 43.1%, 完全能够适应各种中红外和远红外的应用需求。

参考文献:

[1] E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid

state physics and electronics[J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58:2059 – 2062.

- [2] S John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58: 2486 – 2489.
- [3] Y Fink, J N Winn, S Fan, et al. A dielectric omnidirectional reflector[J]. Science, 1998, 282:1679 – 1682.
- [4] J N Winn, Y Fink, S Fan, et al. Omnidirectional reflection from a one-dimensional photonic crystal [J]. Opt. Lett., 1998, 23:1573 – 1575.
- [5] D N Chigrin, A V Lavrinenko, D A Yarotsky, et al. Observation of total omnidirectional reflection from a one-dimensional dielectric lattice[J]. Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process, 1999, 68:25 – 28.
- [6] D N Chigrin, A V Lavrinenko, D A Yarotsky, et al. All-dielectric one-dimensional periodic structures for total omnidirectional reflection and partial spontaneous emission control [J]. J. Lightwave Technol., 1999, 17:2018 – 2024.
- [7] M Deopura, C K Ullal, B Temelkuran, et al. Dielectric omnidirectional visible reflector [J]. Opt. Lett., 2001, 26: 1197 – 1199.
- [8] Yeonsang Park, Young-Geun Roh, Chi-O Cho, et al. GaAs-based near-infrared omnidirectional reflector [J]. Appl. Phys. Lett., 2003, 82:2770 – 2772.
- [9] B Temelkuran, E L Thomas, J D Joannopoulos, et al. Low-loss infrared dielectric material system for dual-range omnidirectional reflectivity[J]. Opt. Lett., 2001, 26:1370 – 1372.
- [10] X Wang, X Hu, Y Li, et al. Enlargement of monidirectional total reflection frequency range in one-dimensional photonic crystals by using photonic heterostructures [J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 80:4291 – 4293.
- [11] C Zhang, F Qiao, J Wan, et al. Enlargement of nontransmission frequency range in photonic crystal by using multiple heterostructures [J]. J. Appl. Phys., 2000, 87: 3174 – 3176.
- [12] Yan Ji-xiang, Wei Guang-hui. Matrix optics[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1995, 219 – 229. (in Chinese)
- [13] Kazuaki Sakoda. Optical Properties of Photonic Crystals, Second Edition[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005:21 – 23.
- [14] H Y Lee, T Yao, J Appl. Design and evaluation of omnidirectional one-dimensional photonic crystals[J]. Phys., 2003, 93:819 – 830.