

太赫兹波段介质微腔光学特性研究*

卢小可 郭茂田 苏建坡 弓巧侠 武进科 刘建立 陈明 马凤英†

(郑州大学物理工程学院, 郑州 450001)

(2012年11月20日收到; 2012年12月9日收到修改稿)

采用匀胶法制备了厚度在微米量级的 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2/\text{TiO}_2$ 和 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{MgO}]^2/\text{TiO}_2$ 多层介质膜反射镜. 采用太赫兹 (THz) 时域透射光谱系统获得了多层膜的时域透射谱. 用传输矩阵法模拟了 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2/\text{TiO}_2$ 和 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{MgO}]^2/\text{TiO}_2$ 两种分布式布拉格反射镜 (DBR) 的反射相移和相位穿透深度等光学特性. 设计了两种结构为 DBR/LT-GaAs/DBR 的对称 THz 光学微腔结构并模拟了腔结构的辐射光谱. 结果表明: 通过引入谐振腔, 两种 DBR 组成的微腔器件在谐振波长处的强度分别提高了 19 和 14 倍. 其中 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2/\text{TiO}_2/\text{LT-GaAs}$ (12 μm)/ $[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2/\text{TiO}_2$ 腔的辐射光谱存在两个峰, 分别位于 208 和 248 μm , 并分析了出现两个谐振峰的原因. 探讨了通过引入介质谐振腔实现对 THz 源的辐射特性进行调控的可行性.

关键词: 分布式布拉格反射镜, 光子晶体, 穿透深度, 太赫兹微腔

PACS: 42.60.Da, 07.57.Hm, 68.35.-p

DOI: 10.7498/aps.62.084208

1 引言

目前, 国内外对太赫兹 (THz) 源进行了广泛而深入的研究, 并取得了很大进展. 采用微腔结构来改善 THz 源辐射特性的研究也在不断深化^[1-3]. 光学微腔是具有高品质因数且尺寸在光波长量级的光学微型谐振腔, 其最简单的结构是具有法布里-珀罗腔结构的一维平面光学微腔, 即 Fabry-Perot 腔. 微腔结构可以使腔内物质的光学态密度发生变化, 出现自发辐射谱线窄化和强度增强的微腔效应^[4-5]. 这一特性对于研究新型高效的 THz 辐射源具有重要的意义. Hideto 等^[6] 制作了分布式布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR) 构成的平面微腔, 分析了微腔对光学态密度的影响, 观察到器件辐射强度在某些频率处增强, 在其他频率处减弱的现象. 吕明等^[7] 采用多孔硅多层膜作为 Bragg 反射镜制备了有机微腔器件, 其光致发光谱的光谱半宽由无腔时的 83 nm 窄化为 4 nm, 非共振模得到有效的抑制. 本课题组^[8] 研究了全金属反射镜构成的平面微腔对 THz 辐射器件的辐射性能的

改善, 与自由空间的光电导 THz 谱相比, 谐振频率的辐射强度提高了 25 倍, 光谱半高全宽压缩了 50 倍.

平面微腔结构主要由一对平行平面镜组成. 常用的微腔反射镜有 DBR 和金属反射镜两种. 其中金属对光的吸收损耗大, 色散效应明显. 相对于金属镜而言, DBR 是光学微腔反射镜的最佳选择. 本文采用匀胶法在高阻硅衬底上制备了结构为 $[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2/\text{TiO}_2$, $[\text{TiO}_2/\text{MgO}]^2/\text{TiO}_2$ 的 DBR 反射镜, 设计了结构为 DBR/LT-GaAs/DBR 的 THz 光学微腔结构, 并模拟了微腔结构的辐射光谱.

2 理论分析

DBR 结构上可看作一维光子晶体. 目前, 已相继提出了多种基于光子晶体的全新光子学器件, 如光子晶体滤波器^[9]等. 光子晶体的最根本性质是具有光子禁带, 落在禁带中的光是被禁止传播的. 一般采用两种折射率不同的介质在空间周期性排列形成光子晶体. 假定材料在考察波段无吸收, 折射率分别为 (n_a , n_b), 厚度为 (d_a , d_b) 的两种介质交替

* 国家自然科学基金 (批准号: 60907046)、河南省青年骨干教师资助计划和河南省自然科学基金 (批准号: 2009A140008) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: fengyingma@163.com

排列形成 $(ab)^m$ 光子晶体的一维周期性结构, 空间周期 $d = d_a + d_b$, 如图 1 所示. 白色部分 a 代表高折射率层, 灰色部分 b 代表低折射率层. 一束频率为 ω 的光从左向右垂直入射 ($\theta = 0$). 根据光在介质薄膜中的传输特性, 运用传输矩阵法计算光子晶体的结构特性.

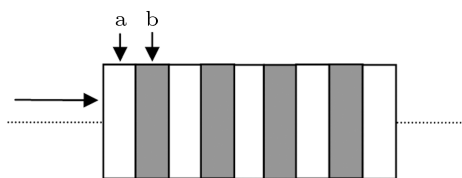


图 1 一维光子晶体结构示意图

根据光在介质界面处电场 E 和磁场 H 满足的边界条件, 每一介质层与光波的相互作用可由下述特征矩阵完全决定:

$$M_a = \begin{bmatrix} \cos \delta_a & \frac{i}{n_a} \sin \delta_a \\ i n_a \sin \delta_a & \cos \delta_a \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$M_b = \begin{bmatrix} \cos \delta_b & \frac{i}{n_b} \sin \delta_b \\ i n_b \sin \delta_b & \cos \delta_b \end{bmatrix}, \quad (2)$$

分别为膜层 a 和 b 的特征矩阵. 其中 $\delta_j = 2\pi n_j d_j / \lambda$ 为薄膜的相位厚度. 矩阵 (1), (2) 包含了薄膜的全部有用参数.

对于结构为 $G|ab|^m a$ 的 DBR 膜系, 其中 G 为衬底, 折射率为 n_G , a, b 分别代表光学厚度为 $\lambda/4$ 的高低折射率材料, m 为周期数. 设入射介质的折射率为 n_0 , 此时整个膜系的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} \cos \delta_a & \frac{i}{\eta_a} \sin \delta_a \\ i \eta_a \sin \delta_a & \cos \delta_a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \delta_b & \frac{i}{\eta_b} \sin \delta_b \\ i \eta_b \sin \delta_b & \cos \delta_b \end{bmatrix} \right\}^m \times \begin{bmatrix} \cos \delta_a & \frac{i}{\eta_a} \sin \delta_a \\ i \eta_a \sin \delta_a & \cos \delta_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_G \end{bmatrix},$$

整个膜系的反射率为

$$R(\lambda) = \left(\frac{n_0 B - C}{n_0 B + C} \right) \left(\frac{n_0 B - C}{n_0 B + C} \right)^*, \quad (3)$$

反射相移为

$$\phi(\lambda) = \arctan \left[\frac{i n_0 (CB^* - BC^*)}{n_0^2 BB^* - CC^*} \right], \quad (4)$$

相位穿透深度^[10] 为

$$L_{\text{DBR}}(\lambda) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{d\phi(\lambda)}{d\lambda}. \quad (5)$$

3 实验

运用匀胶法在单面抛光的高阻硅衬底 (厚度 $400 \mu\text{m}$, 晶向 $\langle 111 \rangle$, 电阻率为 $5000 \Omega \cdot \text{cm}$, 在 THz 波段的折射率为 $n_G = 3.4$ ^[11]) 上制备厚度在微米量级的 $[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2/\text{TiO}_2$, $[\text{TiO}_2/\text{MgO}]^2/\text{TiO}_2$ 的 DBR. DBR 中心波长选为 $200 \mu\text{m}$, 对应膜系中 TiO_2 , Al_2O_3 , MgO 的厚度分别为 778 , 982 和 837 nm . 采用首都师范大学 THz 教育部重点实验室的 Zomega-Z3 型 THz 时域光谱透射系统获得多层膜的时域透射谱. 系统辐射光谱范围为 $0.1\text{--}3.5 \text{ THz}$, 频谱分辨率小于 $5 \times 10^{-3} \text{ THz}$, 最大时延大于 1.3 ns , THz 波发射源为低温砷化镓 (LT-GaAs), 探测器为 ZnTe . 为了消除空气中水分对 THz 波的吸收, 整个系统工作时需要持续充入氮气.

4 结果与讨论

图 2 为膜系 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2/\text{TiO}_2$ 和 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{MgO}]^2/\text{TiO}_2$ 的时域透射谱经傅里叶变换后的频域透射谱. 从图 2 中可以看出, 两种膜系结构的禁带特性都非常明显. 膜系 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2/\text{TiO}_2$ 的中心波长在 $225 \mu\text{m}$, 与设计的 $200 \mu\text{m}$ 存在 $25 \mu\text{m}$ 的偏移. 其原因可能是采用旋涂法成膜, 成膜性能与蒸镀法相比在致密性及膜层之间的附着性上都相差很多. 形成的膜层在微观上是疏松多孔的结构, 且各膜层表面很难保证严格平行. 中心波长处的反射率达到 94% , 在 $190\text{--}260 \mu\text{m}$ 波段范围内的反射率均超过 90% , 且反射谱线较为平滑. 而膜系 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{MgO}]^2/\text{TiO}_2$ 的中心波长与设计结果基本符合, 中心波长处的反射率也达到 90% , 反射谱线有较小振荡, 主要是因为 MgO 溶液配制过程中很容易出现团簇现象, 且旋涂后的膜非常易碎, 须经 1100°C 以上高温煅烧才能保证测试过程中膜的完整性. 图 3 为膜系 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2/\text{TiO}_2$ 和 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{MgO}]^2/\text{TiO}_2$ 的反射相移. 从图 3 中可以看出, 两种膜系反射相移在截止区均与波长基本成线性关系. 中心波长处的反射相移始终为 π . 图 4 为两种膜系结构的相位穿透深度. 可以看出, 在相应的禁带区域相位穿透深度基本保持不变.

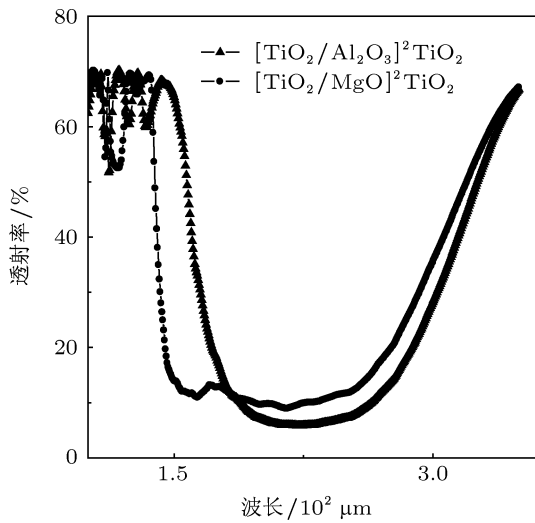
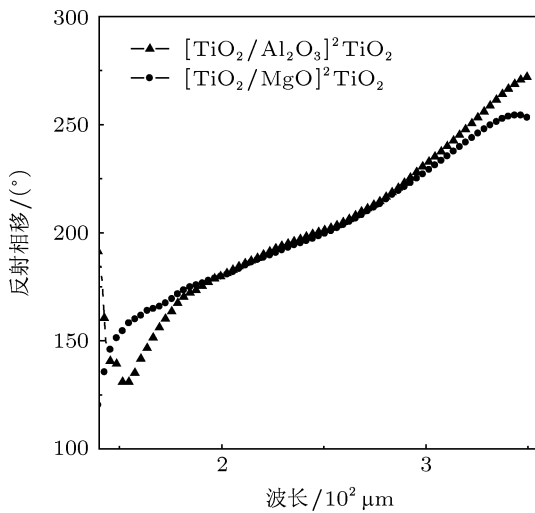
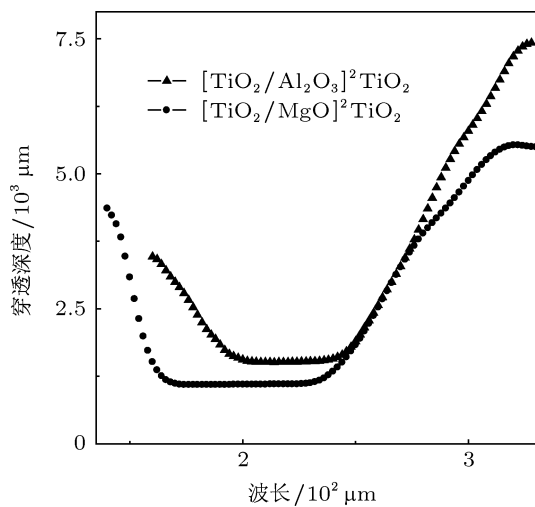
图2 Si/[TiO₂/Al₂O₃]²TiO₂ 和 Si/[TiO₂/MgO]²TiO₂ 的透射谱图3 Si/[TiO₂/Al₂O₃]²TiO₂ 和 Si/[TiO₂/MgO]²TiO₂ 的反射相移图4 Si/[TiO₂/Al₂O₃]²TiO₂ 和 Si/[TiO₂/MgO]²TiO₂ 的相位穿透深度

图5为以 [TiO₂/Al₂O₃]²TiO₂ 或 [TiO₂/MgO]²TiO₂

为两端反射镜, 设计的 THz 介质镜对称微腔结构. 腔内材料采用 LT-GaAs, 它在 THz 频域内的吸收系数很小, 色散很弱, 可以认为其折射率为常数 $n = 3.45$ [12], 通过改变 LT-GaAs 厚度可实现辐射峰值的连续调谐. 图6和图7分别为 Si/[TiO₂/Al₂O₃]²TiO₂/LT-GaAs (12 μm)/[TiO₂/Al₂O₃]²TiO₂ 和 Si/[TiO₂/MgO]²TiO₂/LT-GaAs (12 μm)/[TiO₂/MgO]²TiO₂ 在垂直腔面方向上的模拟发射光谱. 其中 I_n 和 I_c 分别为 LT-GaAs 在自由空间和腔结构中的发射光谱. 从图6可以看出, 器件 Si/[TiO₂/Al₂O₃]²TiO₂/LT-GaAs (12 μm)/[TiO₂/Al₂O₃]²TiO₂ 在 DBR 的透射禁带存在两个峰, 分别位于 208 和 248 μm, 因此这两个峰均为腔的谐振峰. 图8为腔的谐振腔长和对应的谐振级次关系图, 图中的直线为 $y = 29 \times (\lambda/2)$, 该直线与腔的谐振腔长在 DBR 的透射禁带有两个交点, 正好位于 208 和 248 μm 附近, 即对应两个峰的谐振级次均为 29, 这主要是由腔的色散效应导致的. 从图6和图7可以看出, 通过引入谐振腔结构, 两种 DBR 组成的微腔结构在谐振峰的强度分别提高了 19 和 14 倍. 通过改变腔内材料的厚度还可以实现调谐和多模发射.

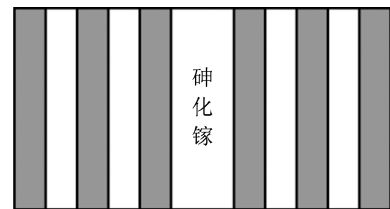
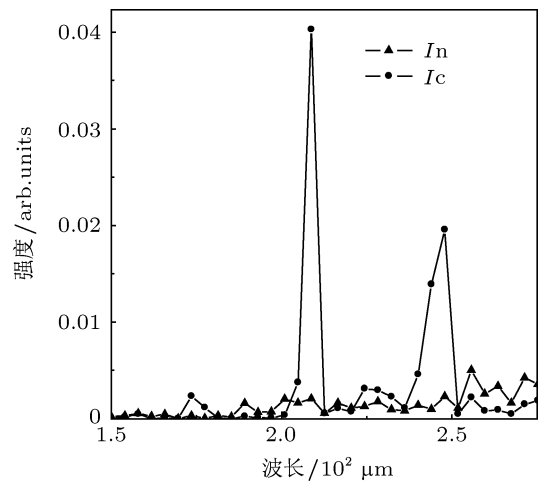


图5 Si/DBR/LT-GaAs/DBR 微腔结构示意图

图6 腔 Si/[TiO₂/Al₂O₃]²TiO₂/LT-GaAs (12 μm)/[TiO₂/Al₂O₃]²TiO₂ 的模拟发射光谱

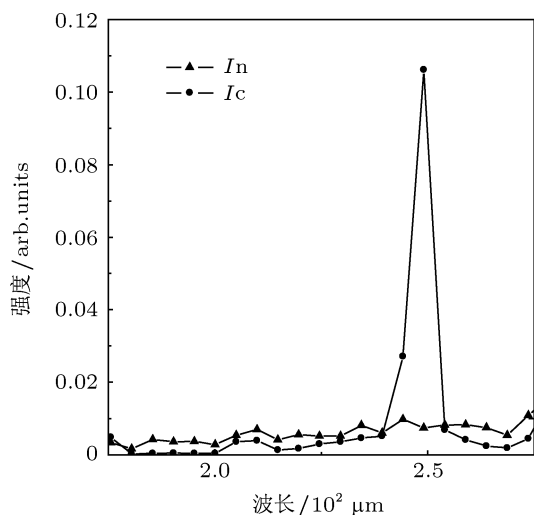


图7 腔 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{MgO}]^2\text{TiO}_2/\text{LT-GaAs}$ ($12\ \mu\text{m}$)/ $[\text{TiO}_2/\text{MgO}]^2\text{TiO}_2$ 的模拟发射光谱

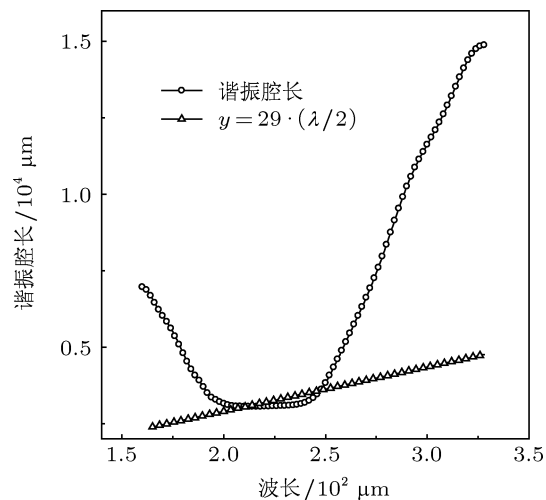


图8 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2\text{TiO}_2/\text{LT-GaAs}$ ($12\ \mu\text{m}$)/ $[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2\text{TiO}_2$ 的有效腔长

5 结论

本文分别以纳米 TiO_2 、 Al_2O_3 和 MgO 粉末为原料, 采用匀胶法制作了厚度在微米量级的 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2\text{TiO}_2$ 和 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{MgO}]^2\text{TiO}_2$ 介质膜系. 利用 Zomeg-Z3 型 THz 时域光谱系统获得样品的时域透射谱. 采用传输矩阵法模拟了 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2\text{TiO}_2$ 和 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{MgO}]^2\text{TiO}_2$ 两种 DBR 的反射相移和相位穿透深度等. 设

计了两种结构的 THz 对称介质腔并模拟了腔的辐射光谱. 模拟结果表明, 与自由空间 THz 器件相比, 微腔器件的峰值功率分别提高了 19 和 14 倍. 器件 $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2\text{TiO}_2/\text{LT-GaAs}$ ($12\ \mu\text{m}$)/ $[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2\text{TiO}_2$ 在 208 和 $248\ \mu\text{m}$ 各有一个发射峰, 通过分析器件有效腔长解释了出现两个谐振峰的原因. 研究了介质镜微腔对 THz 波段光学器件的调控特性, 为实现小型化、集成化的 THz 源提供了一种有效途径.

- [1] Burgess I B, Zhang Y, McCutcheon M W, Rodriguez A W, Bravo-Abad J, Johnson S G, Loncar M 2009 *Opt. Express* **17** 20099
- [2] Batista A A, Citrin D S 2004 *Opt. Lett.* **29** 367
- [3] Zhang T Y, Wang Y S, Fan W H, Zhu S L, Zhao W 2008 *Acta Photon. Sin.* **37** 219 (in Chinese) [张同意, 王屹山, 范文慧, 朱少岚, 赵卫 2008 光子学报 **37** 219]
- [4] Kao C C, Lu T C, Huang H W, Chu J T, Peng Y C, Yao H H, Tsai J Y, Kao T T, Kuo H C, Wang S C, Lin C F 2006 *Photon. Technol. Lett.* **18** 877
- [5] Kao C C, Peng Y C, Yao H H, Tsai J Y, Chang Y H, Chu J T, Huang H W, Kao T T, Lu T C, Kuo H C, Wang S C, Lin C F 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 081105
- [6] Hideto S, Eiji K, Tatsuya K, Hayato M, Shyun K, Shunsuke N, Hiroshi I, Masanori H, Tae G K, Noriaki T 2009 *Appl. Opt.* **48** 6934
- [7] Lü M, Xu S H, Zhang S T, He J, Xiong Z H, Deng Z B, Ding X M 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2083 (in Chinese) [吕明, 徐少辉, 张松涛, 何钧, 熊祖洪, 邓振波, 丁训民 2000 物理学报 **49** 2083]
- [8] Ma F Y, Chen M, Li U X L, Liu J L, Chi Q, Du Y L, Guo M T, Yuan B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 114205 (in Chinese) [马凤英, 陈明, 刘晓莉, 刘建立, 池泉, 杜艳丽, 郭茂田, 袁斌 2012 物理学报 **61** 114205]
- [9] Chen H M, Meng Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014202 (in Chinese) [陈鹤鸣, 孟晴 2011 物理学报 **60** 014202]
- [10] Yu Z F, Ma F Y, Su J P, Chen M, Chi Q 2010 *Acta Photon. Sin.* **39** 1967 (in Chinese) [余振芳, 马凤英, 苏建坡, 陈明, 池泉 2010 光子学报 **39** 1967]
- [11] Ma F Y, Su J P, Gong Q X, Yang J, Du Y L, Guo M T, Yuan B 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 097803
- [12] Shinho C 2006 *J. Korean Phys. Soc.* **48** 1224

Optical properties of terahertz dielectric microcavity*

Lu Xiao-Ke Guo Mao-Tian Su Jian-Po Gong Qiao-Xia Wu Jin-Ke
Liu Jian-Li Chen Ming Ma Feng-Ying[†]

(School of Physical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

(Received 20 November 2012; revised manuscript received 9 December 2012)

Abstract

In this paper, multilayer films $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2/\text{TiO}_2$ and $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{MgO}]^2/\text{TiO}_2$ with thickness values from microns to tens of microns are fabricated by spin-coating method. The transmission spectra of these films are obtained by terahertz time-domain transmission spectrum system (THz-TDS). The phase shifts of reflection and phase penetration depths of $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2/\text{TiO}_2$ and $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{MgO}]^2/\text{TiO}_2$ are simulated by the transfer matrix method. On this basis, two kinds of symmetrical THz microcavities each with a structure of DBR/LT-GaAs/DBR are designed and the radiation spectra are also simulated. The results show that the intensities of two microcavities are enhanced by 19 and 14 times at resonance wavelength, respectively. There are two resonance peaks in the emission spectrum of the structure $\text{Si}/[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2/\text{TiO}_2/\text{LT-GaAs}$ (12 μm)/ $[\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]^2/\text{TiO}_2$, which are located at 208 μm and 248 μm , respectively. The reason is discussed based on the effective cavity length. The feasibility to regulate the emission properties of the THz source by introducing dielectric microcavities is discussed.

Keywords: distributed Bragg reflector, photonic crystal, penetration depth, THz microcavity

PACS: 42.60.Da, 07.57.Hm, 68.35.-p

DOI: 10.7498/aps.62.084208

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60907046), the Natural Science Foundation of Henan Province, China (Grant No. 2009A140008), and the Foundation for Young Core Teacher of Henan Province, China.

[†] Corresponding author. E-mail: fengyingma@163.com