

# 基于二维光子晶体的温控光衰减器

陈之厦, 梁斌明\*, 庄松林

上海理工大学光电信息与计算机工程系, 上海 200093

**摘要** 提出了一种基于法布里-珀罗腔的二维光子晶体温控光衰减器, 此结构利用掺杂硅的热光效应对光子晶体折射率进行线性调制, 折射率的变化引起了光子晶体的带隙以及法布里-珀罗腔光程差的变化, 并导致反射率在某一温度区间内随温度线性变化, 实现了对入射光的可控衰减。利用商业电磁仿真软件 CST 模拟了含掺杂硅的基于法布里-珀罗腔的光子晶体反射率光谱曲线, 该曲线随温度发生平移; 并仿真了此结构在特定频率下, 其反射率随温度变化的规律, 在频率为 0.284 THz 时, 曲线具有较好的线性度; 仿真了 4 种不同的入射角情况, 并对入射角为 3° 的温度-反射率曲线进行了线性拟合, 得出了表征公式。最终设计出了一款调谐幅度为 0~7.68% 的光子晶体温控光衰减器。

**关键词** 光学器件; 光子晶体; 光衰减器; 热光效应; Drude 模型; 掺杂硅; 太赫兹

**中图分类号** O431.1; O436

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP56.152301

## Temperature-Controlled Optical Attenuator Based on Two-Dimensional Photonic Crystals

Chen Zhixia, Liang Binming\*, Zhuang Songlin

*Department of Photoelectric Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China*

**Abstract** A two-dimensional photonic crystal optical attenuator with temperature control based on the Fabry-Pérot cavity is proposed. The structure utilizes the linear modulation of the refractive index of the photonic crystal induced by thermo-optic effect of the doped silicon. The change in refractive index causes variations in the photonic crystal bandgap and optical path difference of the Fabry-Pérot cavity. This causes linear variation in reflectivity as a function of temperature within a specific temperature domain, which realizes the controllable attenuation of the incident light. A commercial electromagnetic simulation software, CST, is used to simulate the reflectance spectrum of the photonic crystal with the Fabry-Pérot cavity after silicon doping, showing that the spectrum curve shifts as a function of temperature. The variation pattern of reflectivity is simulated for this structure as a function of temperature at several specific frequencies. It is found that the curve has relatively good linearity at a frequency of 0.284 THz. The simulation is conducted for incidence angles of 1°, 3°, 5°, and 8°, respectively, whereas the linear fitting is performed for the temperature-reflectivity curve at 3°, through which the characterization formula is obtained. A temperature-controlled photonic crystal optical attenuator with a tuning amplitude of 0~7.68% is designed.

**Key words** optical devices; photonic crystal; optical attenuator; thermo-optic effect; Drude model; doped silicon; terahertz

**OCIS codes** 230.5298; 350.4238; 160.5690; 040.2235

## 1 引言

1987 年, Yablonovich<sup>[1]</sup> 和 John<sup>[2]</sup> 分别独立地提出了光子晶体的概念, 光子晶体是由具有不同介

电常数的物质在空间周期性排列而形成的人工微结构。其特殊的光子带隙特性, 使得特定频率的电磁波无法在光子晶体内部传播。利用该特性, 研究人员在光子晶体中填充了功能性材料液晶, 以期通过

收稿日期: 2019-01-09; 修回日期: 2019-03-01; 录用日期: 2019-03-07

\* E-mail: Liangbinming@sina.com

改变外部电场、温度或者偏振光等来调控其光子晶体禁带,进而实现基于光子晶体的光调制器<sup>[3-5]</sup>。

在光通信线路中,光衰减器<sup>[6-8]</sup>通常用于调节光功率、模拟光纤长距离传输或者传输距离的动态检测等。随着我国光通信事业的飞速发展,液晶光子晶体光衰减器<sup>[9]</sup>成为了研究学者们关注的热点,此种光衰减器具有结构简单、体积小,以及易于集成等优点。

在液晶光子晶体的基础上,本文提出了一种填充的功能性材料——掺杂硅,除了利用掺杂硅对太赫兹波段光波的吸收能力外,还通过热光效应调控了光子晶体的折射率,进而引起了光子带隙的移动,以及法布里-珀罗(F-P)腔光程差的变化,最终实现了对光功率的连续调控。

## 2 原理及设计

### 2.1 晶体的结构设计

频率落在光子带隙内的电磁波在周期性的方向上将被禁止传播,并与其内部共振模耦合从而被捕获,最后被反射出去<sup>[10]</sup>。基于此原理,本文将光子晶体的材料换成了对太赫兹波具有吸收效应的掺杂硅,即可制成在光子带隙内有吸收效应的光子晶体吸收器,所对应的吸收峰为光子晶体吸收峰;在此基础上添加金属反射镜,与光子晶体形成了 F-P 谐振,产生了 F-P 谐振峰。通过适当调节结构参数,可使两吸收峰各自变宽并靠近,得到一个宽频吸收器。

如图 1 所示,光子晶体晶格常数为  $a=500\ \mu\text{m}$ ,掺杂硅厚度为  $h=190\ \mu\text{m}$ ,空气槽深度为  $d=170\ \mu\text{m}$ ,半径为  $r=195\ \mu\text{m}$ ,反射镜的材料为金,镜面到光子晶体的距离为  $s$ ,垂直入射横电(TE)波,

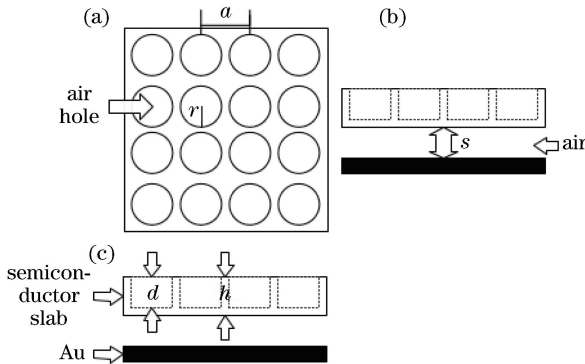


图 1 晶体结构的三视图。(a)俯视图;(b)左视图;(c)正视图

Fig. 1 Three views of crystal structure. (a) Top view;

(b) left view; (c) front view

背景材料为空气。

### 2.2 晶体材料性能的表征

为了取得更好的吸收效率,本文使用掺杂硅作为光子晶体的材料。在太赫兹波段内,复折射率可以由 Drude 模型<sup>[11]</sup>表征为

$$n^2 = \epsilon_1 + i\epsilon_2 = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\Gamma)}, \quad (1)$$

$$\epsilon_1 = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (2)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\omega^2 \tau}{\omega(1 + \omega^2 \tau^2)}, \quad (3)$$

式中: $\epsilon_\infty=12$ ,这是由于非掺杂硅对束缚电子产生屏蔽效应,且在仿真频率范围内 $\epsilon_\infty$ 可被当作常数;

$\Gamma = \frac{1}{\tau}$ 为碰撞频率; $\omega_p$ 为等离子频率, $\omega_p^2 =$

$\frac{N_c e^2}{\epsilon_0 m^*}$ ,其中 $N_c$ 为载流子密度, $e$ 为电子电荷, $\epsilon_0$ 为真空介电常数, $m^*$ 为有效载体质量, $m^* = 0.26m_0$ , $m_0$ 为自由电子质量。

### 2.3 晶体的热光效应

在光子晶体工作温度范围( $0\sim 220\ ^\circ\text{C}$ )内,温度变化与介质折射率间的关系可表达为<sup>[12]</sup>

$$\Delta = \alpha \cdot n \cdot \Delta T, \quad (4)$$

式中: $n$ 为介质的折射率; $\alpha$ 为介质的热光系数; $\Delta T$ 为温度变化量。在太赫兹波段,硅的热光系数为 $\alpha = 1.86 \times 10^{-4}\ ^\circ\text{C}^{-1}$ 。本文使用的掺杂硅的等离子频率为 $3.934529 \times 10^{12}\ \text{rad/s}$ ,碰撞频率为 $9.68015 \times 10^{12}\ \text{rad/s}$ ,少量掺杂时近似取用此公式。

## 3 仿真结果及讨论

使用商业电磁仿真软件 CST2014 进行模拟实验。为了方便测量,选取反射率 $R=1-T-A$ 来表征光子晶体的性能和变化,其中 $T$ 和 $R$ 分别为结构的透射率和反射率。由于金属镜面在仿真波段为全反射,因此透射率 $T=0$ 。图 2 分别为(实线)不含光子晶体结构的硅板、(虚线)含光子晶体结构的硅板,以及(圆点线)带有镜面的光子晶体硅板的反射光谱。由图 2 可知,在仿真频率范围内,不含任何结构的硅板的反射率约为 $70\% \sim 90\%$ ;含光子晶体结构的硅板在 $0.297 \sim 0.315\ \text{THz}$ (范围约为 $0.18\ \text{THz}$ )波段有一个反射率小于 $10\%$ 的波谷;而带有镜面的光子晶体硅板在 $0.279 \sim 0.326\ \text{THz}$ (范围约为 $0.47\ \text{THz}$ )波段有一个宽频的接近 $0\%$ 的反射率波谷,其是由光子晶体吸收峰与镜面-光子晶体所形成

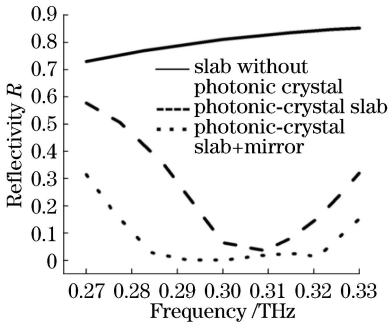


图 2 3 种不同光子晶体结构的硅板的反射光谱  
Fig. 2 Reflectivity spectra of three Si slabs with and without photonic crystal

的 F-P 谐振吸收峰两者共同吸收后的反射结果。

由(1)~(4)式可知:温度每变化 20 °C,反映在 Drude 模型上为折射率  $n$  增加 0.0128,则 0~220 °C 对应的折射率  $n$  为 3.451~3.592。图 3 所示为不含镜面的光子晶体分别在折射率为 3.451, 3.463, 3.476, 3.489, … (依次增加 0.0128), 3.579, 3.592 时,即温度为 0, 20, 40, 60, …, 200, 220 °C 时的反射率曲线。由图 3 可知,随着温度的增加,反射率曲线向低频移动;从 0 °C 变化到 220 °C,曲线大约左移了 0.1 THz。图 4 所示为带有镜面( $s = 190 \mu\text{m}$ )的光子晶体分别在折射率为 3.451, 3.463, 3.476, 3.489, …, 3.579, 3.592 时,即温度为 0, 20, 40, 60, …, 200, 220 °C 时的反射率曲线。由图 4 可知,随着温度的增加,反射率曲线同样向低频移动;从 0 °C 变化到 220 °C,曲线大约左移了 0.15 THz。尽管反射率曲线出现了左移,但带有镜面的光子晶体在 0.29~0.31 THz 依然表现出了稳定的接近于 0 的反射率,也就意味着在此波段,光子晶体是一个良好的不受温度影响的太赫兹波吸收器。此外,在 0.28~0.285 THz 波段,其还具备了制作光衰减器的潜质,即温度在 0~220 °C 之间变化时,反射率也在相应的变化,且反射率会在某一温度处达到 0。

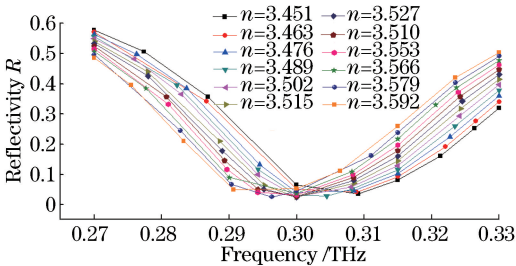


图 3 在不同温度情况下不含镜面的光子晶体的反射光谱  
Fig. 3 Reflectivity spectrum of photonic crystal without mirror at different temperatures

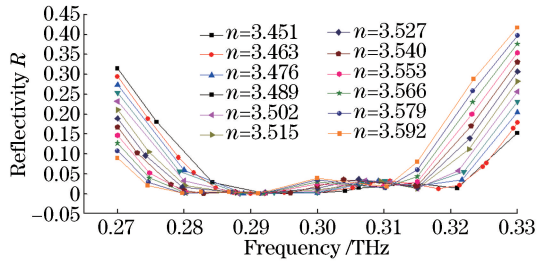


图 4 在不同温度情况下带镜面( $s = 190 \mu\text{m}$ )的光子晶体的反射光谱

Fig. 4 Reflectivity spectrum of photonic crystal with mirror at different temperatures ( $s = 190 \mu\text{m}$ )

从图 4 中分别截取 0.280, 0.281, 0.282, 0.283, 0.284 THz 这 5 个频率点的不同温度的反射率值,并绘制出了如图 5 所示的温度-反射率曲线图,图中横坐标为结构所处的温度,纵坐标为反射率,不同的曲线代表不同的入射光频率  $f$ 。由图 5 可知,在某一频率曲线上,随着温度的增加,反射率逐渐减小,直至为 0;并且随着入射光频率的增大,反射率减小至 0 所需的温度也越来越小。在  $f = 0.284 \text{ THz}$  时,100 °C 以上的反射率为零,100 °C 以下的反射率曲线的线性度较好,因此本文选取此频率作为光衰减器的工作频率。

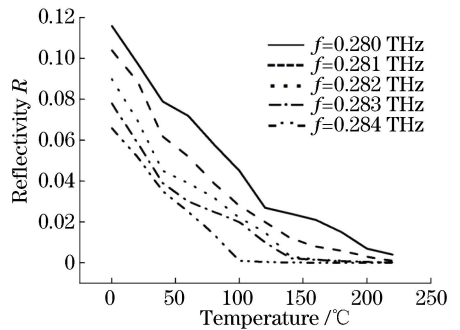


图 5 5 个频率点的温度-反射率曲线图

Fig. 5 Temperature-reflectivity curves at five frequencies

为了方便测量,在实际应用中,入射光通常会带有一定的入射角度。在频率为 0.284 THz 时,对入射角  $i$  分别为 1°、3°、5°、8° 的情况做了仿真模拟,其温度-反射率曲线如图 6 所示。由图 6 可知,随着入射角度的增加,反射率曲线整体向上移动,为达到零反射率,所需的温度也越来越大。为满足线性度以及零反射率的要求,本文选取 3° 作为温控光衰减器的入射角,并对其进行线性拟合,如图 7 所示(因为 160 °C 以后的反射率皆为为零,所以只对 0~160 °C 进行拟合),直线为拟合曲线。图中采用的拟合公式为  $y = -0.000512x + 0.0768, R^2 = 0.9917$  为其拟合度

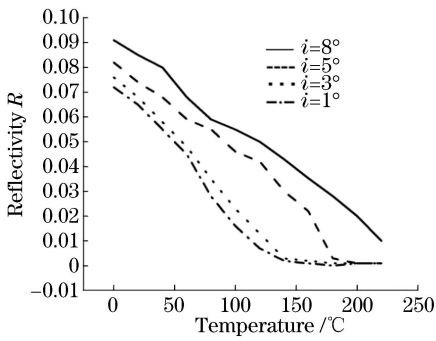


图6 不同入射角的温度-反射率曲线

Fig. 6 Temperature-reflectivity curves at different incident angles

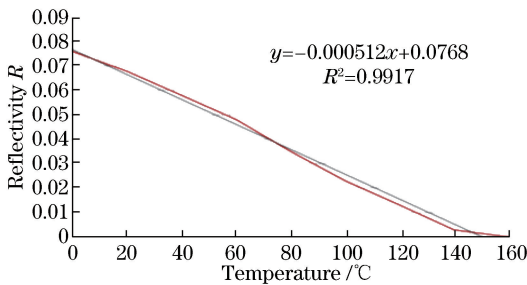


图7 温度-反射率曲线趋势图

Fig. 7 Trends of temperature-reflectivity curves

参数(越接近 1, 拟合越好), 通过调整温度就可以控制此光衰减器的反射率, 例如, 当温度设定为 40 °C 时, 代入  $x=40$  即可得出此结构的反射率为 5.6%。

## 4 结 论

利用光子晶体的光子带隙对光波的捕获能力, 将光子晶体的材料换成对此波段有吸收效果的掺杂硅来制成光子晶体吸收器, 再加上一层反射镜, 在消除透射率的同时, 可以使光子晶体吸收峰和 F-P 谐振吸收峰共同强化温度对反射率曲线的影响, 从而达到完善光子晶体温控光衰减器的目的。当垂直入射时, 在 0.28~0.285 THz 频段, 通过调整结构所处的温度(0~220 °C), 即可得到零反射率。尤其是在  $f=0.284$  THz 时, 100 °C 以上反射率即为零, 且 100 °C 以下的反射率曲线的线性度较好, 因此本文选取此频率为光衰减器的工作频率。为了方便测量, 在实际应用当中, 入射光通常会带有一定的入射角度。在频率为 0.284 THz 时, 对 4 种不同的入射角情况进行了仿真模拟, 在入射角为 3°, 温度达到 160 °C 时, 反射率为零, 其 0~160 °C 的温度-反射率曲线可以被公式表征(拟合度  $R^2=0.9917$ )。利用该公式, 通过调整温度即可控制此光衰减器的反射

率, 例如, 当温度设定为 40 °C 时, 代入  $x=40$ , 可得此结构的反射率为 5.6%。最终设计出一款反射率调谐幅度为 0~7.68% 的光子晶体温控光衰减器。

## 参 考 文 献

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] Wang D D, Li B H, Qi B, *et al.* Design for liquid crystal photonic crystal fiber and thermal tuning characteristic analysis [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 030602.  
王豆豆, 李百宏, 齐兵, 等. 液晶光子晶体光纤的设计及热调谐特性分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 030602.
- [4] Jiang J F, Wu H, Liu K, *et al.* Wavelength tuning of Stokes optical pulse with high speed and wide range for coherent anti-Stokes Raman scattering excitation source [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0101002.  
江俊峰, 吴航, 刘琨, 等. 用于相干反斯托克斯拉曼散射激发源的快速宽范围斯托克斯光波长调谐 [J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0101002.
- [5] Liang W Y, Chen J F, Li Z Y. Electrically controlled beam steering with wide deflection angles in liquid crystal photonic crystals [J]. Journal of Optics, 2018, 20(7): 075106.
- [6] Wan J, Guo A J, Yan F, *et al.* A new variable optical attenuator based on microfluidics [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0923001.  
万静, 郭安金, 严峰, 等. 基于微流控技术的新型可调光衰减器 [J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0923001.
- [7] Song X J, Wang Z, Li Q, *et al.* Development of weighting device for photon spiking neuron [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0406003.  
宋晓佳, 王智, 李强, 等. 光子脉冲神经元权重器件的研制 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0406003.
- [8] Li M X, Wang L, Dong L H. Development of a novel optical variable attenuator in lithography exposure system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0103002.  
李美萱, 王丽, 董连和. 光刻曝光系统中新型光可变衰减器的研制 [J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0103002.
- [9] Poornalakshmi U, D M S G, Iyer V, *et al.* Variable

- optical attenuator using X-shaped photonic crystal ring resonator[C] // 13th International Conference on Fiber Optics and Photonics, Kharagpur December 4-8, 2016, Kanpur, India. Washington, D. C. : OSA, 2016: Tu4A.78.
- [10] Gao L, Liang B M, Wang T, *et al.* Refractive index sensor based on photonic crystal and Fabry-Perot cavity[J]. *Optical Instruments*, 2016, 38(3): 248-251.
- 高伦, 梁斌明, 王婷, 等. 基于光子晶体和法布里珀罗腔结构的折射率传感器[J]. *光学仪器*, 2016, 38(3): 248-251.
- [11] Yoon G, So S, Kim M, *et al.* Electrically tunable metasurface perfect absorber for infrared frequencies [J]. *Nano Convergence*, 2017, 4: 36.
- [12] Lu Z R, Liang B M, Ding J W, *et al.* Goos-Hänchen shift based on nearzero-refractive-index materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(15): 154208.
- 陆志仁, 梁斌明, 丁俊伟, 等. 近零折射率材料的古斯汉欣位移的特性研究 [J]. *物理学报*, 2016, 65(15): 154208.