

金属银对光子晶体光吸收的增强效应

赵宏斌¹, 苏安¹, 邹秒宏¹, 李福生¹, 蒙成举², 黄育飞², 高英俊³

(1. 河池学院 数理学院, 广西 宜州 546300; 2. 河池学院 人工智能与制造学院, 广西 宜州 546300;

3. 广西大学 物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004)

摘要:构造含金属银缺陷的光子晶体模型 $(AB)^mAGA(BA)^m$, 利用传输矩阵法理论, 通过计算机计算仿真的方式, 研究了金属银缺陷对光子晶体光吸收特性的增强效应, 发现当光子晶体中引入金属银缺陷后, 光子晶体的光反射率和吸收率均得到增强。在 400 ~ 1400 nm 范围内, 平均反射率增强到 93.87%, 平均吸收率增强到 6.13%, 且吸收率大小和位置可调。随着周期数 m 或 B 介质层厚度 d_B 增大, 光子晶体的光吸收率均得到增强, 当 $m=5$ 时吸收率高达 98.72%, 当 $d_B=118.52$ nm 时吸收率高达 99.59%, 且吸收峰的位置随 m 增大向短波方向移动, 但随 d_B 增大向长波方向移动。随着光入射角度 θ 增大, 光子晶体的光吸收率先增强到极大值后再逐渐减弱, 且吸收峰的位置随入射角 θ 增大向短波方向移动。随着 A 介质层厚度 d_A 增大, 光子晶体的光吸收率减弱, 当 $d_A=73.22$ nm 时吸收率为 98.72%, 且吸收峰的位置随 d_A 增大向长波方向移动。含金属银缺陷光子晶体的光吸收特性, 可为新型光学吸收器、太阳能电池、滤波器和全反射器等材料研究和选择提供理论参考。

关键词:金属银; 光子晶体; 缺陷; 光学吸收; 调制

中图分类号: O614.122; O734 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.07.018

Enhancement effect of metallic silver on optical absorption of photonic crystals

ZHAO Hong-bin¹, SU An¹, ZOU Miao-Hong¹, LI Fu-sheng¹, MENG Cheng-ju²,
HUANG Yu-fei², GAO Ying-ju³

(1. Institute of Mathematical, Hechi University, Yizhou 546300, China;

2. School of Artificial Intelligence and Smart Manufacturing, Hechi University, Yizhou 546300, China;

3. College of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The structure model $(AB)^mAGA(BA)^m$ of photonic crystal with metallic silver defects is constructed and the enhancement effect of metallic silver defects on the light absorption characteristics of photonic crystals is studied by means of computer calculation simulations using the theory of transmission matrix method. It is found that when the metallic silver defects are introduced into the photonic crystal, the optical reflectivity and absorption of the photonic crystal are enhanced. In the range of 400 ~ 1400 nm, the average reflectivity is increased to 93.87%, and the average absorption rate is increased to 6.13%, and the magnitude and position of the absorption is adjusted. With the increase

基金项目:国家自然科学基金(No. 51161003);河池学院 2018 年高层次人才科研启动费项目(No. XJ2018GKQ017);河池学院科研重点项目(No. 2022XJZD002);2021 年广西区级大学生创新创业计划训练项目(No. 202110605062);2022 年国家级大学生创新创业计划训练项目(No. 202210605004)资助。

作者简介:赵宏斌(1997-),男,学士,主要从事光子晶体方面的研究。E-mail:1280406426@qq.com

通讯作者:苏安(1973-),男,教授,硕士,主要从事光电材料与器件方面的研究。E-mail:suan3283395@163.com

收稿日期:2022-09-20

of the period number m or the thickness d_B , the optical absorption rate of the photonic crystal is enhanced. When $m = 5$, the absorption rate is up to 98.72%, and when $d_B = 118.52$ nm, the absorption rate is up to 99.59%. The position of the absorption peak moves to the short-wave direction with the increase of m , but moves to the long-wave direction with the increase of d_B . With the increase of the incident angle θ , the light absorption of the photonic crystal increases to the maximum value first and then decreases gradually, and the position of the absorption peak moves to the short-wave direction with the increase of the incident angle θ . As the thickness of A medium layer d_A increases, the optical absorption rate of photonic crystal weakens. When $d_A = 73.22$ nm, the absorption rate is 98.72%, and the position of absorption peak moves to the direction of long wave with the increase of d_A . The light absorption characteristics of photonic crystals with metallic silver defects can provide theoretical references for the research and selection of new optical absorbers, solar cells, filters and total reflectors.

Keywords: metallic silver; photonic crystal; defect; optical absorption; modulation

1 引言

光子晶体是一种将不同介电常数的薄膜介质材料按一定规律排列的人工微结构光学材料,其概念最早于 1987 年由 John S 和 Yablonovitch E 分别提出^[1-2]。光子晶体最显著的光学特性是对光具有选择性通过的光子带隙结构,电磁波受周期性势场中布拉格散射的影响会形成能带结构,能带结构之间会形成间隙,即光子晶体带隙。根据光子带隙结构的特征,可以通过合理构造光子晶体结构实现人为的控制和利用光传播行为的目的,这种光学特性可为设计无损耗光波导器、光学滤波器、光开关、光吸收器等高性能的新型光学器件提供指导^[3-8]。在光子晶体中的恰当位置引入某种缺陷材料,将会破坏原有的周期性结构,在光子晶体中产生缺陷从而形成新的带隙结构,并且缺陷处会局域大量的光子,使其中的光子态密度大大增强。利用这一特性,即可实现高品质的窄带滤波功能或全反射镜功能等。大量的研究表明,在光子晶体结构中科学合理的在不同位置引入缺陷,或在同一位置引入不同介质缺陷,不仅可以改变光子晶体原有的周期性排列结构,更重要的是能够改变光子晶体的光传输特性,提升人们所需要的光学传输品质^[5-8]。

已有的研究报道表明,在光子晶体中引入金属材料后可以提高光子晶体结构对光的吸收作用,且含金属缺陷的光子晶体似乎有着更好的光学特性和金属特性,前人研究表明,利用掺杂金属的材料构成含金属缺陷的光子晶体,可产生光学 Tamm 态,进而提高反射率或吸收率。近年来,有研究者采用金属-非金属-金属的结构模型构成了 Fabry-Pérot 谐振腔,增强了光子晶体的吸收能力,可见在光子晶体中合适的位置引入金属缺陷确实能在一定程度上增

强光子晶体对光的反射或吸收能力^[3-8]。在光子晶体中不同的位置引入相同的金属材料或在同一位置引入不同的金属材料,其光学特性也应该会存在一定的差异。基于此思考,构造出光子晶体-金属-光子晶体的结构模型,将金属银作为缺陷材料引入到光子晶体结构中,在合理选择结构介质及参数的基础上,通过计算机数值计算模拟的方式研究其光传输特性及调制规律,结果可为多带宽光吸收器、太阳能电池、光开关等新型高效光学器件的设计和制作提供理论依据。

2 结构模型与计算方法

利用基元介质材料 A、B 及金属材料 G 构造一维光子晶体结构模型 $(AB)^m AGA (BA)^m$, 如图 1 所示。

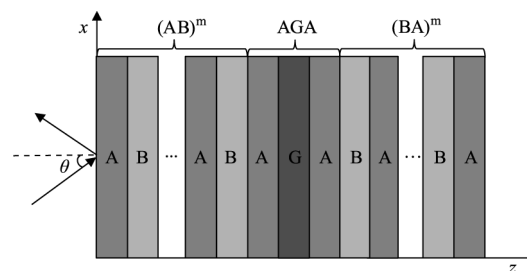


图 1 光子晶体结构模型

Fig. 1 The structures of photonic crystal

模型中 m 是 AB 介质交替排列的重复周期数, $(AB)^m$ 和 $(BA)^m$ 的周期数 m 可以取相同或不同的正整数,基元介质材料 A、B 分别为金刚石(C)和三氟化铯(CeF_3),对应的折射率和物理厚度分别为 $n_A = 2.42$ 、 $d_A = 73.22$ nm、 $n_B = 1.63$ 、 $d_B = 108.02$ nm,缺陷层 G 为金属银,厚度取 $d_C = 760.00$ nm,金属折射率与其介电常数有关,考虑到金属内自由电子及束缚电子对金属介电常数色散关系的影响,文中采用 Drude-Lorentz 模型^[9-13]来计算不同波长情况下金属银的介电常数,具体计算公式如下:

$$\varepsilon_c = 1 - \frac{\Omega_p^2}{\omega(\omega - i\Gamma_0)} + \sum_{j=1}^k \frac{f_j \omega_p^2}{(\omega_j^2 - \omega^2) + i\omega\Gamma_j},$$

$$\Omega_p = \sqrt{f_0} \omega_p \quad (1)$$

式中, ω 是入射光的频率; $\omega = 2\pi c/\lambda$, ω_p 是金属银中等离子体的共振频率; Γ 是阻尼系数; f 为振子强度, 亦即阻尼系数为 Γ_j 的电子所占权重为 f_j 。则金属银的复折射率 $n_c = n + ki$, 其中折射率 n 和消光系数 k 是复折射率的实部和虚部, 分别用如下公式计算:

$$\begin{cases} n = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\varepsilon_{GReal}^2 + \varepsilon_{GImag}^2)^{\frac{1}{2}} + \varepsilon_{GReal}]^{\frac{1}{2}} \\ k = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\varepsilon_{GReal}^2 + \varepsilon_{GImag}^2)^{\frac{1}{2}} - \varepsilon_{GReal}]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (2)$$

根据复折射率介质的特性可知, 当金属银的折射率虚部 k 为正数时, 会产生一定的衰减作用, 故将金属银作为缺陷材料, 引入到传统光子晶体材料中, 可对光子晶体对光的吸收起到一定的增益效果^[14]。

利用上述公式, 可计算出不同波长情况下金属银对应的折射率及介电常数, 如图 2 所示。横坐标表示波长, 取 400 ~ 1400 nm, 纵坐标表示介电常数, 图中实线表示金属银在不同波长时介电常数的实部, 虚线表示金属银在不同波长时介电常数的虚部。从图 2 可见, 金属银介电常数实部受波长影响较大, 而虚部受波长影响相对较小。将金属银在不同波长时的介电常数代入公式(2)进一步计算可知, 金属银的复折射率中, 实部 n 和虚部 k 均会随波长的增大而增大, 但虚部 k 随波长增大的速度较快, 即虚部 k 对波长的响应速度较快。

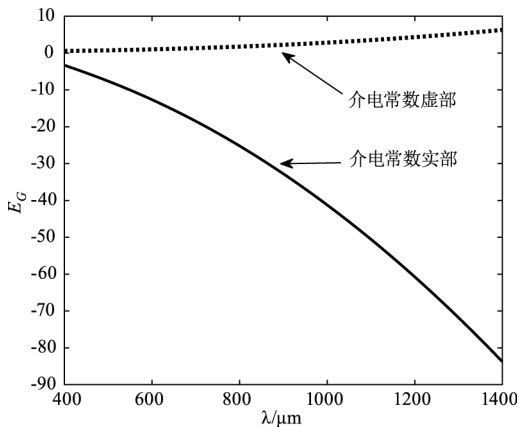


图2 金属银介电常数随波长的变化情况

Fig. 2 The dielectric constant of metallic silver varies with wavelength

引入金属银缺陷材料后, 光在光子晶体中的传播行为, 仍然可采用传输矩阵法进行计算模拟^[3,12-18], 其要义是首先分层计算出光在任意基元

薄膜介质层中的传输行为, 可用传输矩阵 M_j 表示, 而后再将所有薄膜介质层的光行为传输矩阵 M_j 相乘, 即可得到光在整个薄膜结构(光子晶体)中的总传输行为, 以总传输矩阵 M 表示。第 j 层的传输矩阵可表示为:

$$\begin{cases} M_j = \begin{bmatrix} \cos\delta_j & -\frac{i}{\eta_j} \sin\delta_j \\ -i\eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \\ \delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos\theta_j \\ \eta_j = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} n_j \cos\theta_j \end{cases} \quad (3)$$

其中, n_j 、 d_j 、 δ_j 和 η_j 分别对应第 j 层的折射率、物理厚度、平面波在介质层中垂直横跨过两个界面时的相位差和有效光学导纳; ε_0 为真空介电常数; μ_0 为真空磁导率; λ 是入射光的波长; θ_j 是入射光与第 j 层法线的夹角。则光在多层基元薄膜介质排列形成的光子晶体结构中的总传输矩阵 M 为:

$$M = M_1 \cdot M_2 \cdot M_j \cdots \cdot M_N = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由总传输矩阵 M 的矩阵元 a_{11} 、 a_{12} 、 a_{21} 、 a_{22} 即可计算出光在光子晶体中的传输特性。

反射系数、反射率:

$$\begin{cases} r = \frac{a_{11}\eta_0 \cos\theta_j + a_{12}\eta_0 \eta_{N+1} \cos\theta_j - a_{21} - a_{22}\eta_{N+1}}{a_{11}\eta_0 \cos\theta_j + a_{12}\eta_0 \eta_{N+1} \cos\theta_j + a_{21} + a_{22}\eta_{N+1}} \\ R = |r|^2 \end{cases} \quad (5)$$

透射系数、透射率:

$$\begin{cases} t = \frac{2\eta_0 \cos\theta_j}{a_{11}\eta_0 \cos\theta_j + a_{12}\eta_0 \eta_{N+1} \cos\theta_j + a_{21} + a_{22}\eta_{N+1}} \\ T = |t|^2 \end{cases} \quad (6)$$

吸收率:

$$A = 1 - R - T \quad (7)$$

3 计算结果与分析

3.1 引入金属银缺陷前后光子晶体的传输特性

若光子晶体结构 $(AB)^m AGA(BA)^m$ 处于空气中, 且只考虑光垂直入射情况, 当排列周期数 $m = 2$ 时, 可计算出光子晶体引入金属银缺陷前后即 $(AB)^2 AA(BA)^2$ 和 $(AB)^2 AGA(BA)^2$ 的光传输谱, 如图 3 所示。图 3 中实线和虚线分别表示不含金属

银缺陷与含金属银缺陷时的反射谱、透射谱和吸收谱,分别如图(a)~(c)所示。

根据图3(a)的实线可知,不含金属银缺陷时,光子晶体对光的反射能力较弱,仅在537.90~1000.00 nm范围内出现两段较强的反射带,在400~1400 nm波长范围内,平均反射率仅为41.50%。再由图3(a)的虚线可知,当引入金属银缺陷后,400~1400 nm波长范围内的反射率大幅提升,平均反射率提升至93.87%。引入金属银缺陷使光子晶体在很宽的波长范围内光反射能力大幅增强的特性,可为宽带光反射镜的设计和制造提供一定的参考作用。

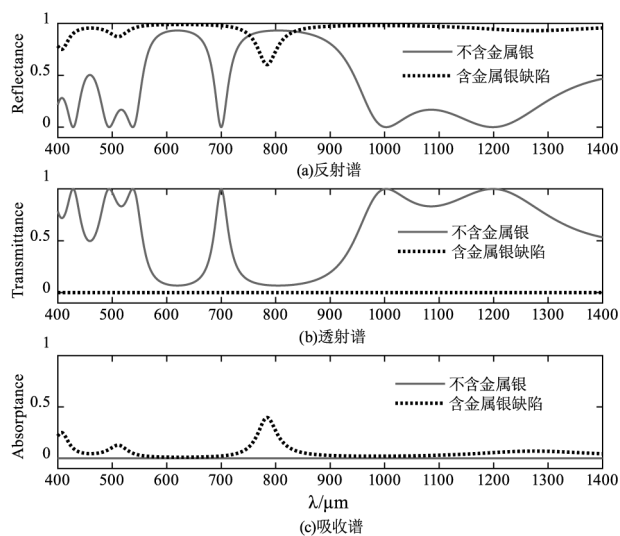


图3 金属银缺陷引入前后的传输谱线对比

Fig. 3 Comparison of transmission lines before and after the introduction of metallic silver defects

从图3(b)中也可看到引入金属银缺陷前后光子晶体透射特性的变化情况。当不含金属银缺陷时,光子晶体在537.90~1000.00 nm波长范围内出现了一条禁带,并在700.00 nm波长位置附近处出现一条透射率为100%的透射峰,在400~1400 nm波长段范围内的平均透射率为58.50%,如图3(b)的实线所示。当引入金属缺陷后,光子晶体在400~1400 nm整个波长范围内的透射率均为0,如图3(b)的虚线所示。

根据反射率和透射率即可分别计算出引入金属银缺陷前后光子晶体对光的吸收情况。由图3(c)中的实线可得,光子晶体在400~1400 nm整个波长范围内的吸收率均为0。当引入金属缺陷后,在400~1400 nm整个波长范围内的吸收率均出现不

同程度的增强,平均吸收率增加至6.13%,并在784.60 nm波长位置附近出现一条较高的吸收峰,其吸收率为39.68%,如图3(c)的虚线所示。可见,当在光子晶体的对称中心引入金属银缺陷后,金属银缺陷不仅改变了光子晶体原有的周期性结构,同时由于金属银是一种介电常数含正虚部的复介质材料,这种复介质材料对光的透射具有衰减的作用,即引入金属银缺陷后,将有更多的光子被局域限制在光子晶体里尤其是缺陷位置处,从而增强了光子晶体对的光吸收能力。

3.2 排列周期数 m 对吸收特性的调制

薄膜介质排列周期数是光子晶体的一个非常重要的参数,当它改变时,光子晶体的光学特性往往也随之改变。因此,在保持其他参数不变的情况下,分别取排列周期数 $m=2,3,4,5$,即可得到不同周期数对光子晶体 $(AB)^m AGA (BA)^m$ 光吸收率的调制规律,如图4所示。图4的纵坐标表示光子晶体的吸收率,横坐标则表示波长。为直观、形象地展现不同周期数 m 情况下光子晶体对光的吸收率,图4只绘制700~900 nm波长范围内784.60 nm位置吸收峰的吸收率变化情况。从图4可见,当 $m=2$ 时,吸收峰的中心处于784.21 nm波长位置处,吸收峰吸收率最大值达到39.68%;当 $m=3$ 时,吸收峰的中心处于775.46 nm波长位置处,而且吸收峰的吸收率明显增大,吸收峰吸收率最大值达到62.16%;当 $m=4$ 时,吸收峰的中心处于771.36 nm波长位置处,吸收峰吸收率最大值达到84.86%;当 $m=5$ 时,吸收峰的中心处于769.26 nm波长位置处,吸收峰吸收率最大值达到98.72%。

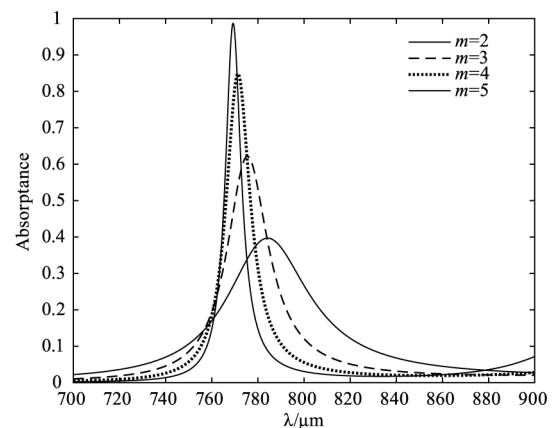


图4 周期数 m 对吸收特性的影响

Fig. 4 Influence of period number m on absorption characteristics

可见,随着排列周期数 m 增大,吸收峰所处的

波长位置向短波方向移动的同时吸收峰的吸收率也迅速增大。究其原因,当把 $(AB)^m$ 和 $(BA)^m$ 看作是光子晶体的左右垒层时,随着排列周期数 m 的增加,光子晶体中的缺陷微腔势垒也随之增大,势垒增大将导致更多的光子被局域限制在光子晶体缺陷微腔中(缺陷位置),即对光子通过光子晶体的限制作用增强,或者说增强了光子晶体的吸收能力。

3.3 介质厚度 d_A 、 d_B 对吸收特性的调制

根据薄膜光学相关理论可知,薄膜介质的厚度直接影响光在其中传播的光程差,进而影响光子晶体结构的特性。因此,可固定排列周期数 $m = 5$,分别取薄膜介质A、B的厚度 $d_A = 73.22 \text{ nm}$ 、 76.72 nm 、 80.22 nm 、 83.72 nm , $d_B = 108.02 \text{ nm}$ 、 111.52 nm 、 115.02 nm 、 118.52 nm ,即可分别计算出薄膜介质厚度 d_A 、 d_B 对光子晶体 $(AB)^5 \text{ AGA} (BA)^5$ 光吸收率的影响规律,如图5(a)和图5(b)所示。

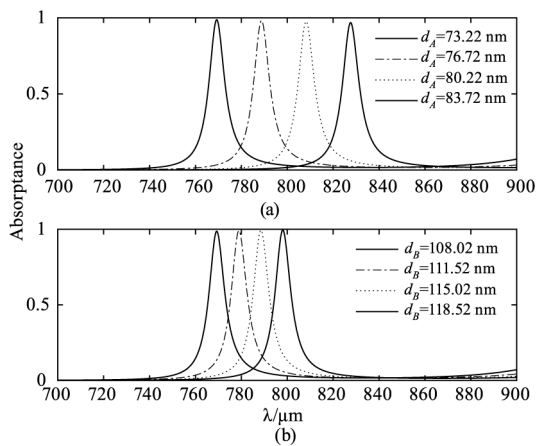


图5 介质厚度 d_A 、 d_B 对吸收特性的影响

Fig. 5 The influence of dielectric thickness d_A and d_B on absorption characteristics

由图5(a)可得,当 $d_A = 73.22 \text{ nm}$ 时,吸收峰的中心处于 769.26 nm 波长位置处,吸收峰吸收率最大值为 98.72% ;当 $d_A = 76.72 \text{ nm}$ 时,吸收峰的中心处于 788.79 nm 波长位置处,吸收峰吸收率最大值为 98.20% ;当 $d_A = 80.22 \text{ nm}$ 时,吸收峰的中心处于 808.24 nm 波长位置处,吸收峰吸收率最大值为 97.58% ;当 $d_A = 83.72 \text{ nm}$ 时,吸收峰的中心处于 827.62 nm 波长位置处,吸收峰吸收率最大值为 96.85% 。

由图5(b)可得,当 $d_B = 108.02 \text{ nm}$ 时,吸收峰的中心处于 769.26 nm 波长位置处,吸收峰吸收率最大值为 98.72% ;当 $d_B = 111.52 \text{ nm}$ 时,吸收峰的中心

中心处于 778.94 nm 波长位置处,吸收峰吸收率最大值为 99.09% ;当 $d_B = 115.02 \text{ nm}$ 时,吸收峰的中心处于 788.53 nm 波长位置处,最大吸收率为 99.38% ;当 $d_B = 118.52 \text{ nm}$ 时,吸收峰的中心处于 798.06 nm 波长位置处,吸收峰吸收率最大值达到 99.59% 。

由此可见,当基元薄膜介质A、B的厚度 d_A 或 d_B 增大时,吸收峰所处的波长位置均向长波方向移动,但随着 d_A 增大,吸收峰的吸收率在逐渐减小,而随着 d_B 增大时,吸收峰的吸收率则快速增大。因为,当A的厚度 d_A 增大时, $(AB)^5$ 或 $(BA)^5$ 中A与G左右两侧的A厚度同时增大,其之间的耦合作用也增强,从而导致了缺陷微腔对光子的局域限制作用减弱,即对光的吸收减弱。而当 d_B 增大时光子晶体的缺陷微腔势垒也随之增大,将使更多的光子被局域限制在光子晶体缺陷微腔中,即导致光子晶体对光的吸收增强。

3.4 入射角度 θ 对吸收特性的调制

进一步的,在保持其他参数不变的情况下,取 $m = 5$, $d_A = 73.22 \text{ nm}$, $d_B = 118.52 \text{ nm}$,入射光线的角度 $\theta = 0^\circ$ 、 15° 、 20° 、 30° 、 45° 、 60° ,即可得不同的入射光线角度 θ 对光子晶体光吸收特性的调制规律,如图6所示。

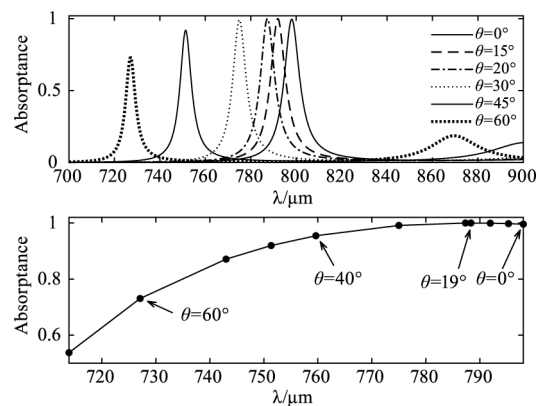


图6 入射角度 θ 对吸收特性的影响

Fig. 6 Influence of incidence angle θ on absorption characteristics

从图6可见,当 $\theta = 0^\circ$ 时,吸收峰的中心处于 798.06 nm 波长位置处,吸收峰吸收率最大值为 99.59% ;当 $\theta = 15^\circ$ 时,吸收峰的中心处于 791.94 nm 波长位置处,吸收峰吸收率最大值达 99.94% ;当 $\theta = 20^\circ$ 时,吸收峰的中心处于 787.34 nm 波长位置处,吸收峰吸收率最大值达 99.99% ;当 $\theta = 30^\circ$ 时,吸收峰的中心处于 775.00 nm 波长位置处,吸收峰吸收率最

大值为 99.14 % ; 当 $\theta = 45^\circ$ 时, 吸收峰的中心处于 751.35 nm 波长位置处, 吸收峰吸收率最大值为 91.97 % ; 当 $\theta = 60^\circ$ 时, 吸收峰的中心处于 727.08 nm 波长位置处, 吸收峰吸收率最大值为 73.07 % , 如图 6 (a) 所示。

可见, 当光线入射角度 θ 增大时, 光子晶体的吸收峰逐渐加速向短波方向移动的同时, 吸收峰的吸收率呈现出先增加再减少的变化趋势。为更加形象直观的呈现入射角对吸收率的调制作用, 以不同入射角对应的吸收峰所处的中心位置波长为横坐标, 以及对应吸收峰吸收率最大值为纵坐标绘图, 结果如图 6 (b) 所示。由图 6 (b) 调制曲线显见, 随着 θ 增大, 吸收峰吸收率先增大到某最大值后逐渐减小。经测算可知, 当入射角 $\theta = 19^\circ$ 时, 吸收峰的吸收率为 100 % , 即光子晶体对光的吸收达到最好效果。入射角度 θ 对光子晶体光吸收特性的调制规律, 对光子晶体太阳能电池的研究和制造具有一定的参考意义。

4 结 论

基于光子晶体 $(AB)^m AGA(BA)^m$ 的结构, 当缺陷 G 为金属银时, 光子晶体的光反射率及吸收率均得到增强, 吸收谱线中出现单条吸收峰, 并且吸收峰对应的波长位置及吸收率可通过排列周期数 m , 介质厚度 d_A 、 d_B 及光入射角度 θ 进行调制, 但调制机制各不相同。通过增加周期数 m 或光入射角度 θ , 可使吸收峰的位置向短波方向移动, 而增加 A 或 B 介质的厚度 d_A 、 d_B 则会使吸收峰的位置向长波方向移动。通过增加周期数 m 或 B 介质的厚度 d_B , 可以提高光子晶体的光吸收率, 而增加 A 介质的厚度 d_A , 则会减小光子晶体的光吸收率。此外, 增加光入射角度 θ , 可使光子晶体的光吸收率先增加后降低, 并于入射角为 19° 时吸收率达到极大值。所构造的含金属银缺陷光子晶体结构模型及其吸收特性, 对光子晶体研究和设计新型光学吸收器、太阳能电池、全反射镜、光开关等具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys Rev-Lett, 1987, 58 (20): 2059 - 2061.
[2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23):

2486 - 2489.

- [3] Taya S A, Doghmosh N, Upadhyay A. Properties of defect modes and band gaps of mirror symmetric metal-dielectric 1D photonic crystals[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53(1).
- [4] Glushko E Ya. Induced resonant electromagnetic piercing in metalized photonic crystal structures[J]. Optik, 2021, 241: 166502.
- [5] Shan Yuanyuan, Li Changhong, Yan Chongqing, et al. Research on the high absorption property of one dimensional ternary photonic crystals with metal layer[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2019, 30(3): 241 - 249. (in Chinese)
单圆圆, 李长红, 闫崇庆, 等. 含金属层一维三元光子晶体结构的高吸收特性研究[J]. 光电子·激光, 2019, 30(3): 241 - 249.
- [6] Mu Yunyun, Liu Hongmei, Li Hang, et al. Sensing characteristics of the gold-silver alloy nanoparticles assembled waveguided metallic photonic crystals[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(9): 2879 - 2884. (in Chinese)
穆云云, 刘红梅, 李行, 等. 基于金-银合金材料的波导耦合金属光子晶体传感特性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(9): 2879 - 2884.
- [7] Wu Jijiang, Gao Jinxia. Selection of metal materials in design of metal-graphene photonic crystal composite structure multi-band optical absorber[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(10): 10 - 15. (in Chinese)
武继江, 高金霞. 金属-石墨烯光子晶体复合结构多带光吸收器设计中金属材料的选择[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(10): 10 - 15.
- [8] Yi Lingjun, Li Changhong. Mag-optical modulator based on parity-time symmetric structure[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 210 - 219. (in Chinese)
易凌俊, 李长红. 基于宇称-时间对称结构的磁光调制器[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 210 - 219.
- [9] Rakic A D, Djuricic A B, Elazar J M, et al. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices. [J]. Applied Optics, 1998, 37(22): 5271 - 5283.
- [10] Rodrigo S G, García-Vidal F J, Martín-Moreno L. Influence of material properties on extraordinary optical transmission through hole arrays[J]. Physical Review B, 2008, 77(7): 878 - 885.
- [11] Liu Dejun, Chen Lin, Cao Duo, et al. Terahertz metallic

- photonic crystals integrated with dielectric waveguides [J]. *Optics Communications*, 2020, 475(1):126197.
- [12] Zhao Yunkun. Research of one-dimensional photonic crystals band gap based on dirac semimetal [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019: 13 - 18. (in Chinese)
赵云琨. 基于狄拉克半金属的一维光子晶体带隙研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2019: 13 - 18.
- [13] Xi Weiwei. Study on optical characteristics of two-dimensional composite photonic crystals based in metal-dielectric multilayer structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2019: 14 - 18. (in Chinese)
席维唯. 基于金属-介质多层结构的二维复式光子晶体光学特性研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019: 14 - 18.
- [14] Su An, Meng Chengju, Jiang Siting, et al. Activation effect of complex medium on the optical propagation properties of optical quantum well [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2):396 - 410. (in Chinese)
苏安, 蒙成举, 江思婷, 等. 复介质对光量子阱光传输特性的激活效应 [J]. *中国光学*, 2020, 13(2): 396 - 410.
- [15] Su An, Meng Chengju, Tang Xiufu, et al. Optical tamm state on the surface of photonic crystal of symmetric structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(8): 817001. (in Chinese)
苏安, 蒙成举, 唐秀福, 等. 对称结构光子晶体的表面光学 Tamm 态 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(8): 817001.
- [16] Chen Ying, Zhou Xinde, Zhou Jian, et al. Fano-resonance sensing mechanism of sub-wavelength dielectric grating-metal Ag thin film-periodic crystal hybrid structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0413001. (in Chinese)
陈颖, 周鑫德, 周健, 等. 亚波长介质光栅-金属 Ag 薄膜-周期性光子晶体混合结构的 Fano 共振传感机理 [J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0413001.
- [17] Wang Bo, Huang Yufei, Su An, et al. Activation effect of complex defects with two ends symmetry on transmission properties of photonic crystals [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(S2): 20200356. (in Chinese)
王波, 黄育飞, 苏安, 等. 两端对称复缺陷对光子晶体透射特性的激活效应 [J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(S2): 20200356.
- [18] Zhao Yali, Jia Kun, Zhao Yan, et al. Effect of metal photonic crystal structure on its transmittance intensity and width [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(14): 14171 - 14175. (in Chinese)
赵亚丽, 贾琨, 赵岩, 等. 金属光子晶体结构对其透光率强度和曲线宽度的影响 [J]. *材料导报*, 2021, 35(14): 14171 - 14175.