

光子晶体二元缺陷微腔的光传输特性

苏安¹, 王高峰¹, 蒙成举¹, 唐秀福¹, 高英俊²

(1. 河池学院 物理与机电工程学院, 广西 宜州 546300;
2. 广西大学 物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 构造和研究了光子晶体插入式二元缺陷和替代式二元缺陷微腔的光学传输特性, 结果表明: 随着二元缺陷自身周期数增大, 微腔透射谱中分立缺陷模的数目增加, 且替代式二元缺陷微腔分立缺陷模多于插入式二元缺陷微腔; 随着缺陷高折射率介质厚度的增大, 二元缺陷微腔的缺陷模向中间靠拢呈现简并趋势, 同时禁带两侧出现多组双缺陷模, 且高频一侧出现双缺陷模多于低频一侧, 但替代式二元缺陷微腔出现的双缺陷模数目多于插入式二元缺陷微腔; 随着缺陷低折射率介质厚度增大, 插入式二元缺陷微腔的缺陷模向低频方向移动同时呈现耦合分开趋势, 且透射率逐渐降低, 而替代式二元缺陷微腔的缺陷模则向中间靠拢呈现简并趋势, 同时缺陷模整体向高频方向缓慢移动, 而透射率保持 100% 不变。光子晶体二元缺陷微腔的光传输特性为光学滤波器、光学开关和激光器等的的设计提供了参考。

关键词: 光开关; 滤波; 二元缺陷; 微腔; 光子晶体

中图分类号: O431; O483; O734 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0620004

Light propagation characteristic of dual defect microcavity of photonic crystal

Su An¹, Wang Gaofeng¹, Meng Chengju¹, Tang Xiufu¹, Gao Yingjun²

(1. Department of Physics and Mechanical & Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou 546300, China;
2. College of Physics Science and Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Light propagation characteristic of dual defect microcavity inserted or replaced by photonic crystal were studied by numerical calculation and simulation. The result shows that when the periodicity of dual defect becomes larger, there will be more defect modes in microcavity transmission spectrum, the modes in replaced dual defect microcavity are more than that in inserted dual defect microcavity. As the high-refractive medium of defect thickens, the defect modes in dual microcavity draw close to the center and tend to degenerate; at the same time, pairs of double defect modes appear on both sides of band gap, with more on the high frequency side and less on the low frequency side; however, the defect mode quantity in replaced dual defect microcavity is larger than that in inserted dual defect microcavity. While the low-refractive medium of defect thickens, defect modes of inserted dual defect microcavity move to

收稿日期: 2016-10-05; 修订日期: 2016-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(51161003); 广西高校科学技术研究项目(KY2015YB258, KY2016LX287);
国家级、广西区级大学生创新训练计划项目(201610605011, 201610605056)

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

low frequency and tend to separate for function coupling, with the transmission index decreasing; but the defect modes of replaced dual defect microcavity draw close to the center and tend to degenerate, and meanwhile the whole defect modes slowly shift to high frequency and the transmissivity remains 100%. These light propagation characteristic provide design reference for optical filter, switch and laser devices.

Key words: optical switch; filter; dual defect; microcavity; photonic crystal

0 引言

光子晶体是一种不同介电材料薄膜周期性排列形成的微结构光学材料,因其独特的光学特性而被认为是光子替代电子进行信息传输的最可能载体,因而成为热门的研究领域^[1-10]。光子晶体最具应用前景的光学特性是存在光子禁带和光子局域。频率落在光子禁带的光被禁止在光子晶体中传播,而当合理地在光子晶体中置入缺陷介质,却可以在缺陷位置形成很强的光子局域,被强局域在缺陷位置的光场可极大提高缺陷处的光子态密度,从而增强相应频率处的受激辐射,最终在宏观的透射能带谱中出现品质很高的缺陷模(或透射峰)^[5-8]。因此,光子晶体的缺陷位置相当于一个光学微腔,该微腔可以把光场局域限制在自己的频率范围内,与微腔频率共振的光可以以共振隧穿的方式通过光子晶体。光子晶体微腔对设计光学滤波器、光学开关、光学波导和激光器等有重要的应用价值^[6-10]。可见,置入怎样的缺陷以及缺陷置入的方式是研究的重点,也是实现人为控制和利用光行为的关键。目前关于缺陷对光子晶体光传输特性影响的报道文献已经很多,但几乎均集中于单一缺陷的研究,而对二元或多元缺陷的研究报道不多。二元缺陷由两种不同的介电材料组成,不仅缺陷自身的排列周期可以变化,同时缺陷介质自身的参数如折射率、厚度等也可以调节,加上缺陷插入方式的不同,则二元缺陷微腔对光子晶体光传输特性的影响及调制方式将更加灵活多样,对光子晶体器件的实际设计和应用将更加广泛。基于此,文中合理选择二元缺陷参数并构造光子晶体结构模型,以插入和替代两种方式置入缺陷形成光子晶体二元缺陷微腔。通过数值计算仿真,研究二元缺陷微腔的光传输特性,为光子晶体设计滤波器、激光器和光开关等新型光学器件提供理论依据。

1 理论方法和结构模型

计算和研究的方法采用传输矩阵法^[6-9]。构造和研究的一维光子晶体模型为 $(TA)_m(PC)_n(TA)_m$ 和 $(TA)_m(PC)_n(AT)_m$,T层介质为二氧化钛(TiO_2),折射率 $n_T=2.96$,A层介质为空气, $n_A=1.0$,P层介质为碲化铅($PbTe$), $n_P=4.1$,C层介质为青铜, $n_C=1.18$, m 、 n 分别是基元介质T、A交替排列及二元缺陷(PC)的周期数,可取任意正整数。对于 $(TA)_m(PC)_n(TA)_m$ 模型, $(PC)_n$ 是插入光子晶体 $(TA)_m(TA)_m$ 周期排列结构A、T之间的一个缺陷块,称为插入式缺陷,如 $m=3$ 、 $n=1$ 时,PC插入A、T之间形成插入式二元缺陷模型TATATA \overline{PC} TATATA;对于 $(TA)_m(PC)_n(AT)_m$ 模型, $(PC)_n$ 是替代光子晶体 $(TA)_m(AT)_m$ 中TA周期排列的T层介质而形成的一个缺陷块,称为替代式缺陷,如 $m=3$ 、 $n=1$ 时,PC替代T形成替代式二元缺陷模型TATATA \overline{PC} ATATAT。

2 计算结果与分析

2.1 二元缺陷微腔的形成

在插入式缺陷 $(TA)_m(PC)_n(TA)_m$ 模型中,P、C介质厚度取值 $d_P=d_C=d_T=d_A=0.5a$,在替代式缺陷 $(TA)_m(PC)_n(AT)_m$ 模型中,P、C介质厚度取值 $d_P=d_C=2d_T=2d_A=a$, a 是可取任意实数的物理厚度常数,亦可理解为晶格常数^[9]。考虑光垂直入射情况(下同),通过传输矩阵法理论并利用计算机编程计算,即可分别模拟出插入式缺陷和替代式缺陷 $(PC)_{10}$ 的带隙结构,以及光子晶体 $(TA)_5(TA)_5$ 和 $(TA)_5(AT)_5$ 的能带结构,如图1所示。图中横坐标 f 表示频率,用归一化频率单位 $\omega a/2\pi c$,纵坐标 t 表示透射率。

从图1可见,无论是插入式缺陷还是替代式缺陷,二元缺陷光子晶体 $(PC)_{10}$ 的能带均完全处于光子晶体 $(TA)_5(TA)_5$ 或 $(TA)_5(AT)_5$ 的禁带中,即构成二

元缺陷微腔。该二元缺陷微腔也可看成是一个光子量子势阱结构, $(PC)_{10}$ 可认为是光子量子势阱的阱层, $(TA)_5(TA)_5$ 或 $(TA)_5(AT)_5$ 则可看成是光子量子势阱的垒层。微腔可以局域限制光场于其中, 使微腔内的光子态密度增强, 导致被束缚在微腔中的光产生频率量子化, 并以共振隧穿的方式通过光子晶体, 表现透射能带谱中的分立精细缺陷模^[6-10]。

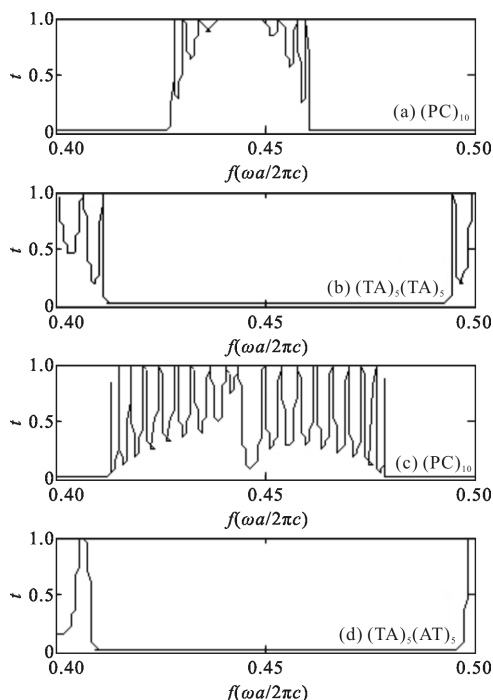


图 1 光子晶体带隙结构

Fig.1 Band gap structures of photonic crystals

2.2 插入式二元缺陷微腔的光传输特性

2.2.1 插入式二元缺陷微腔的透射谱

取插入式二元缺陷微腔 $(TA)_m(PC)_n(TA)_m$ 参数取值 $m=5, n=1, 2, 3, 4, 5, d_p=d_c=d_t=d_A=0.5a$, 则光子晶体二元缺陷微腔 $(TA)_5(PC)_n(TA)_5$ 的透射谱, 如图 2 所示。

由图 2 可见, 随着 n 增大, 在 $0.4563 \sim 0.5217\omega/2\pi c$ 频率范围内, 二元缺陷微腔的透射谱中出现了透射率为 100% 的分立精细缺陷模, 而且缺陷模的条数与 n 值相等。对比图 2 和图 1(a)~(b) 知, 图 2 中分立缺陷模分布的频率范围与图 1(a) 二元缺陷 $(PC)_n$ 能带分布的频率范围相同, 即缺陷模分布的频率范围就是微腔所在的频率范围, 而且当光传播到光子晶体中时被局域限制在这个二元缺陷微腔中, 并产生频率量子化效应, 这些量子化的光隧穿通过光子晶

体后形成透射能带谱中带宽很窄的精细缺陷模^[6-10]。

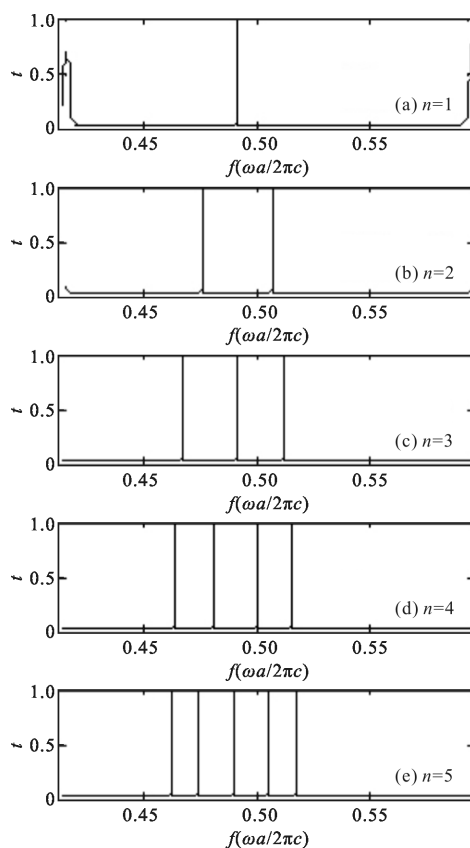


图 2 $(TA)_5(PC)_n(TA)_5$ 的透射谱

Fig.2 Transmission spectrum of $(TA)_5(PC)_n(TA)_5$

2.2.2 d_p 倍数对插入式二元缺陷微腔透射谱的调制

当 P、C 介质的厚度发生变化时, $(PC)_n$ 的结构将发生改变, 则二元缺陷微腔的透射谱特性亦将改变。首先研究缺陷高折射率介质 P 的厚度 d_p 倍数增大对二元缺陷微腔透射谱的影响。仍固定 $m=5, n=2, d_c=d_t=d_A=0.5a$, 取 $d_p=0.5a, 1.0a, 1.5a, 2.0a$ 和 $2.5a$ 等倍数依次递增, 可模拟出 $(TA)_5(PC)_2(TA)_5$ 的透射谱, 如图 3 所示。

从图 3 可见, 当 $d_p=0.5a$ 时, 由于 $(PC)_n$ 的排列周期数 $n=2$, 光子晶体二元缺陷微腔的透射谱中间出现 2 条分立的缺陷模, 当高折射率介质 P 的厚度 d_p 倍数增大, 这两条缺陷模逐渐向中间靠拢, 形成简并的趋势。当 $d_p=0.5a$ 时, 两条缺陷模分别处于 $0.4746\omega/2\pi c$ 和 $0.5057\omega/2\pi c$ 频率处, 两者间距 $\Delta\omega=0.0311\omega/2\pi c$; 当 $d_p=1.5a$ 时, 两者分别处于 $0.4829\omega/2\pi c$ 和 $0.4945\omega/2\pi c$ 频率处, 两者间距 $\Delta\omega=0.0116\omega/2\pi c$; 当 $d_p=2.5a$ 时, 两者分别处于

0.484 8 $\omega a/2\pi c$ 和 0.491 9 $\omega a/2\pi c$ 频率处, 两者间距 $\Delta\omega=0.007 1\omega a/2\pi c$, 如图 3(a)~(e)所示。显然, 当 d_p 倍数增大到一定数值时, 两条缺陷模就会简并重合在一起。

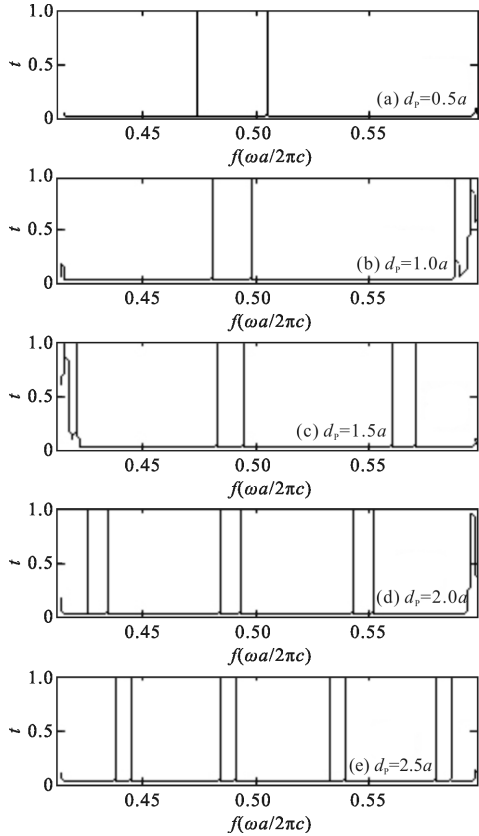


图 3 d_p 对 $(TA)_5(PC)_2(TA)_5$ 透射谱的影响

Fig.3 Influence of d_p on transmission spectrum of $(TA)_5(PC)_2(TA)_5$

另外, d_p 倍数增大, 禁带两侧逐渐成对出现新的缺陷模(双缺陷模结构), 当 $d_p=1.5a$ 时, 禁带的右侧(高频一侧)出现 2 条缺陷模, 当 $d_p=2.0a$ 时, 禁带的左侧(低频一侧)出现 2 条缺陷模, 当 $d_p=2.5a$ 时, 禁带的右侧出现两组即 4 条缺陷模, 禁带左侧仍然为 2 条, 即禁带高频一侧新增双缺陷模的速度快于低频一侧。并且, 随着 d_p 倍数增大, 两侧新增的双缺陷模也向禁带中间靠拢, 同时双缺陷模之间的距离逐渐变短。以禁带右侧第一组双缺陷模为例, 当 $d_p=1.5a$ 时, 双缺陷模分别处于 0.558 8 $\omega a/2\pi c$ 和 0.570 2 $\omega a/2\pi c$ 频率处, 两者间距 $\Delta\omega=0.011 4\omega a/2\pi c$, 两者的中心位于 0.564 5 $\omega a/2\pi c$ 频率处; 当 $d_p=2.0a$ 时, 两者分别处于 0.5421 $\omega a/2\pi c$ 和 0.551 0 $\omega a/2\pi c$ 频率处, 两者间距 $\Delta\omega=0.089\omega a/2\pi c$, 两者的中心位

于 0.551 7 $\omega a/2\pi c$ 处; 当 $d_p=2.5a$ 时, 两者分别处于 0.531 7 $\omega a/2\pi c$ 和 0.538 9 $\omega a/2\pi c$ 频率处, 两者间距 $\Delta\omega=0.0072\omega a/2\pi c$, 两者的中心位于 0.535 3 $\omega a/2\pi c$ 频率处; 对于禁带左侧双缺陷模, 在 $d_p=2.0a$ 时, 两者分别处于 0.427 4 $\omega a/2\pi c$ 和 0.435 6 $\omega a/2\pi c$ 频率处, 两者间距 $\Delta\omega=0.008 2\omega a/2\pi c$, 两者的中心位于 0.431 5 $\omega a/2\pi c$ 频率处; 在 $d_p=2.5a$ 时, 两者分别处于 0.438 3 $\omega a/2\pi c$ 和 0.445 3 $\omega a/2\pi c$ 频率处, 两者间距 $\Delta\omega=0.007 0\omega a/2\pi c$, 两者的中心位于 0.441 8 $\omega a/2\pi c$ 处, 如图 3(c)~(e)所示。

2.2.3 d_c 倍数对插入式二元缺陷微腔透射谱的调制

固定 $m=5, n=2, d_p=d_t=d_A=a/2$, 取 $d_c=0.50a, 0.65a, 0.75a, 0.85a$ 和 $0.95a$ 等倍数依次递增, 可得出低折射率缺陷介质 C 的厚度 d_c 增大对二元缺陷微腔 $(TA)_5(PC)_2(TA)_5$ 透射谱的调制结果, 如图 4 所示。

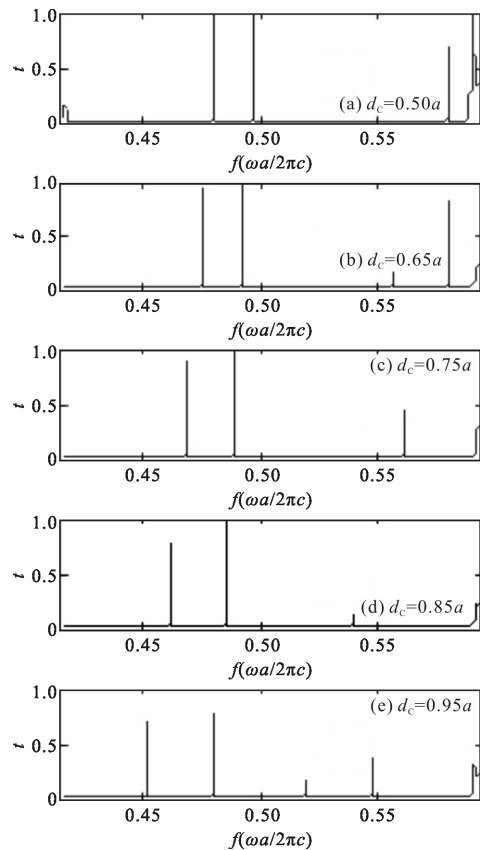


图 4 d_c 对 $(TA)_5(PC)_2(TA)_5$ 透射谱的影响

Fig.4 Influence of d_c on transmission spectrum of $(TA)_5(PC)_2(TA)_5$

从图 4 可见, 随着 d_c 倍数增大, 禁带中的两条缺陷模逐渐向低频方向移动, 而且左侧(处于低频一侧)缺陷模移动的速度稍快, 即两条缺陷模呈现耦合

分开的趋势。当 $d_c=0.50a$ 时, 两条缺陷分别处于 $0.4806\omega a/2\pi c$ 和 $0.4976\omega a/2\pi c$ 频率处, 两者间距 $\Delta\omega=0.0170\omega a/2\pi c$; 当 $d_c=0.75a$ 时, 两缺陷模分别处于 $0.4686\omega a/2\pi c$ 和 $0.4894\omega a/2\pi c$ 频率处, 两者间距 $\Delta\omega=0.0208\omega a/2\pi c$; 当 $d_c=0.95a$ 时, 两缺陷模分别处于 $0.4514\omega a/2\pi c$ 和 $0.4808\omega a/2\pi c$ 频率处, 两者间距 $\Delta\omega=0.0294\omega a/2\pi c$ 。同时, 随着 d_c 倍数增大时, 两缺陷模蓝移的同时透射率也随之逐渐下降, 而且低频一侧缺陷模的透射率下降速度稍快。当 $d_c=0.50a、0.65a、0.75a、0.85a$ 和 $0.95a$ 时, 低频一侧缺陷模的透射率依次为 100%、95.95%、87.43%、76.91% 和 69.33%, 高频一侧缺陷模的透射率则依次为 100%、100%、100%、100% 和 75.42%。另外, 随着 d_c 增大, 禁带高频一侧出现新的缺陷模并向低频方向移动, 但新增缺陷模的透射率较低且 d_c 越大透射率越低。

2.3 替代式二元缺陷微腔的光传输特性

2.3.1 替代二元缺陷微腔的透射谱

当 $(PC)_n$ 为替代式缺陷时, 固定 $(TA)_m(PC)_n(AT)_m$ 的 $m=5, d_p=d_c=2d_r=2d_A=a$, 取 $n=1, 2, 3, 4, 5$, 则可得二元缺陷微腔 $(TA)_5(PC)_n(AT)_5$ 的透射谱, 如图 5 所示。

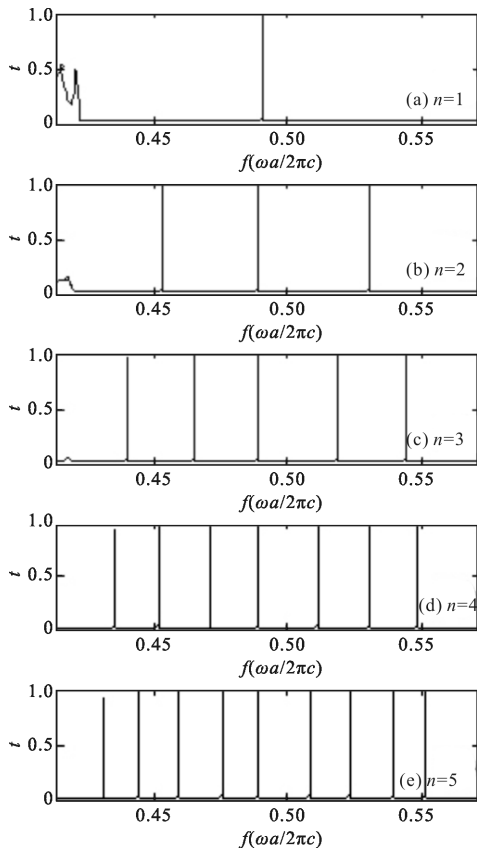


图 5 $(TA)_5(PC)_n(AT)_5$ 的透射谱

Fig.5 Transmission spectrum of $(TA)_5(PC)_n(AT)_5$

由图 5 可见, 随着 n 增大, 在 $0.4267\sim 0.5578\omega a/2\pi c$ 频率范围内, 二元缺陷微腔的透射谱中也出现了透射率很高的分立精细缺陷模, 而且缺陷模的条数与 $2n-1$ 值相等, 而且图 5 缺陷模分布的频率范围也处于图 1(c) 二元缺陷 $(PC)_n$ 能带所处的频率范围, 即缺陷模处于微腔的频率范围。说明光子晶体 $(TA)_m(PC)_n(AT)_m$ 中也形成了缺陷微腔, 且微腔中被局域的光也产生了频率量化并隧穿通过光子晶体。另外, 不同于插入缺陷微腔, 替代缺陷微腔的透射谱中心 $0.4894\omega a/2\pi c$ 处恒定出现缺陷模, 随 n 增大新增的缺陷则分布于缺陷模的两侧, 这与光子晶体 $(TA)_m(AT)_m$ 是镜像对称结构有关^[6-9]。图 5 与图 2 相比还看到, 在 n 相等的条件下替代式二元缺陷微腔透射谱中的分立透射峰多于插入式二元缺陷微腔。原因从图 1(a) 与 (c) 看出: 替代式缺陷 $(PC)_n$ 的能带频率范围明显宽于插入缺陷 $(PC)_n$ 的能带频率范围, 于是微腔中被局域量子化的光频率范围也广, 共振隧穿缺陷模数量就多。

2.3.2 d_p 倍数对替代式二元缺陷微腔透射谱的调制

固定 $(TA)_m(PC)_n(AT)_m$ 的 $m=5, n=2, d_c=2d_r=2d_A=a$, 取 $d_p=1.0a, 2.0a, 3.0a, 4.0a, 5.0a$, 可得出缺陷高折射率介质 P 的厚度 d_p 对缺陷微腔 $(TA)_5(PC)_2(AT)_5$ 透射谱的调制规律, 如图 6 所示。

在图 6 中, 透射谱中间恒定出现 3 条分立的窄缺陷模, 当 d_p 增大时, 这 3 条缺陷模向中间靠拢出现简并趋势。当 $d_p=1.0a$ 时, 该 3 条缺陷模分别处于 $0.4534\omega a/2\pi c、0.4894\omega a/2\pi c$ 和 $0.5311\omega a/2\pi c$ 频率处; 当 $d_p=3.0a$ 时, 三者分别处于 $0.4729\omega a/2\pi c、0.4884\omega a/2\pi c$ 和 $0.5068\omega a/2\pi c$ 频率处; 当 $d_p=5.0a$ 时, 三者分别处于 $0.4782\omega a/2\pi c、0.4882\omega a/2\pi c$ 和 $0.5000\omega a/2\pi c$ 频率处。即中心缺陷模产生了微小的蓝移。另外, 随着 d_p 倍数增大, 禁带两侧也成对出现缺陷模, 而且高频一侧出现双缺陷模的速度比低频一侧稍快。除去中间恒定出现的 3 条缺陷模, 当 $d_p=2.0a$ 时, 禁带右侧出现一组完整的双缺陷模, 左侧也出现双缺陷模但透射率比较低; 当 $d_p=3.0a$ 时, 禁带右侧出现第二组双缺陷模, 而左侧的第一组双缺陷模才趋于完整; 当 $d_p=5.0a$ 时, 禁带右侧已经出现第四组双缺陷模, 而左侧才出现第二组。同时, 这些新增的双缺陷模也随 d_p 增大而向中间靠拢。相比插入式二元缺陷微腔, d_p 增大时替代式二元缺陷微腔禁

带两侧出现的双缺陷模更多,说明替代式二元缺陷微腔对 d_p 的响应灵敏于插入式二元缺陷微腔。

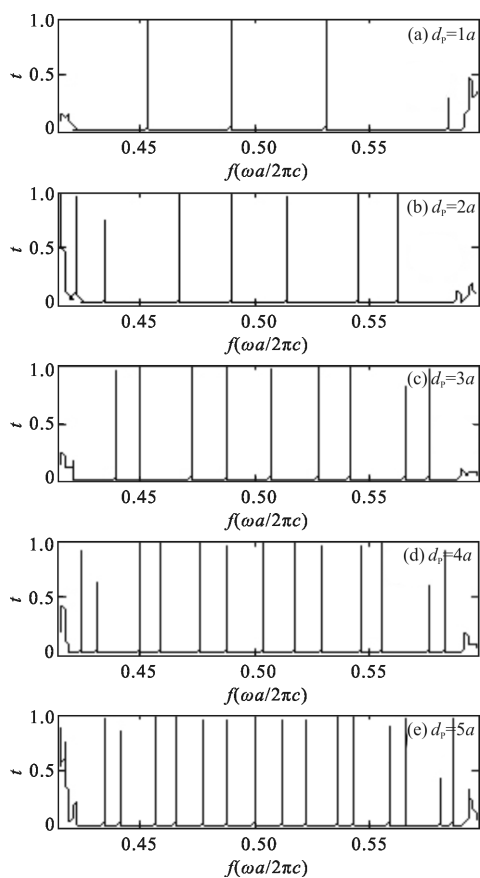


图 6 d_p 对 $(TA)_5(PC)_2(TA)_5$ 透射谱的影响

Fig.6 Influence of d_p on transmission spectrum of $(TA)_5(PC)_2(TA)_5$

2.3.3 d_c 倍数对替代式二元缺陷微腔透射谱的调制

仍固定 $m=5, n=2, d_p=2d_T=2d_A=a$, 取 $d_c=1.0a, 2.0a, 3.0a, 4.0a$ 和 $5.0a$, 则可得出光子晶体二元缺陷微腔 $(TA)_5(PC)_2(AT)_5$ 的透射谱, 如图 7 所示。

对比图 7 和图 4 可见, 替代式二元缺陷微腔对 d_c 的响应不同于插入式二元缺陷微腔。替代式二元缺陷微腔禁带中缺陷模一直保持 3 条且透射率一直保持 100%, 且 d_c 增大时 3 条缺陷模向中间靠拢呈现简并趋势。另外, 3 条缺陷模的中心随 d_c 增大向高频方向移动。当 $d_c=1.0a$ 时, 3 条缺陷模分别处于 $0.4534\omega/2\pi c, 0.4894\omega/2\pi c$ 和 $0.5311\omega/2\pi c$ 频率处; 当 $d_c=3.0a$ 时, 三者分别处于 $0.4681\omega/2\pi c, 0.4904\omega/2\pi c$ 和 $0.5200\omega/2\pi c$ 频率处; 当 $d_c=5.0a$ 时, 三者分别处于 $0.4745\omega/2\pi c, 0.4914\omega/2\pi c$ 和 $0.5152\omega/2\pi c$ 频率处。显然左右两条缺陷模之间的

距离越来越短, 而中间缺陷模则产生了红移。

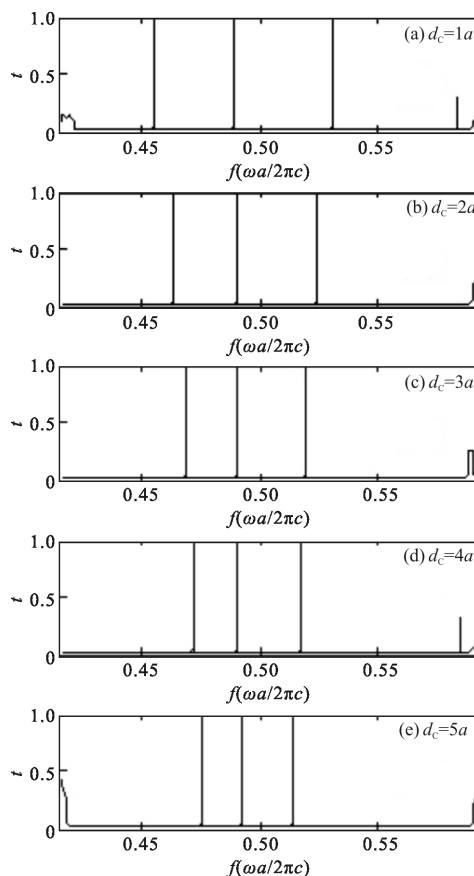


图 7 d_c 对 $(TA)_5(PC)_2(TA)_5$ 透射谱的影响

Fig.7 Influence of d_c on transmission spectrum of $(TA)_5(PC)_2(TA)_5$

可见, 插入式二元缺陷微腔和替代式二元缺陷微腔的光传输特性及调制规律对设计光学滤波器、光学开关或光学衰减器等具有指导价值。

3 结论

插入式二元缺陷微腔和替代式二元缺陷微腔的光传输特性对二元缺陷排列周期数和缺陷介质厚度的响应比较灵敏, 但响应机制有所不同, 且两者对缺陷高、低折射率介质的厚度响应机制也不同。

(1) 二元缺陷自身排列周期数可调节插入式二元缺陷微腔和替代式二元缺陷微透射能带谱中分立缺陷模的数目, 但相同条件下替代式二元缺陷微腔的分立缺陷模数目多于插入式二元缺陷微腔。

(2) 随着缺陷高折射率介质厚度的增大, 二元缺陷微腔的缺陷模向禁带中间靠拢趋于简并, 同时禁带两侧出现多组双缺陷模, 且新增双缺陷模的数目

是高频一侧多于低频一侧, 替代式二元缺陷微腔多于插入式二元缺陷微腔。

(3) 随着缺陷低折射率介质厚度增大, 插入式二元缺陷微腔的缺陷模向低频方向移动的同时透射率逐渐降低, 且两缺陷出现耦合分开现象, 而替代式二元缺陷微腔的缺陷模则向中间靠拢呈简并趋势, 且透射率不变并整体向高频方向缓慢红移。

光子晶体二元缺陷微腔的光传输特性, 可指导新型光学器件的设计。

参考文献:

- [1] Liu Jie, Tie Shengnian, Lu Huidong. Multi-channel drop filter based on two-dimensional photonic crystal [J]. *Optic and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1021–1027. (in Chinese)
刘杰, 铁生年, 卢辉东. 多信道二维光子晶体滤波器[J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1021–1027.
- [2] Li Chuanqi, Fan Qingbin, Lu Ye, et al. Multi channel heterophotonic crystal filter [J]. *Optic and Precision Engineering*, 2015, 23(8): 2171–2177. (in Chinese)
李传起, 范庆斌, 陆叶, 等. 多信道异质结构光子晶体滤波器[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2171–2177.
- [3] Yang Jing, Gong Cheng, Zhao Jiayu, et al. Fabrication of terahertz device by 3D printing technology [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 77–85. (in Chinese)
杨晶, 龚诚, 赵佳宇, 等. 利用3D打印技术制备太赫兹器件[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 77–85.
- [4] Jia Xiuli, Wang Xiaou, Zhou Zhongxiang, et al. Latest progress on chiral negative refractive index metamaterials[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 548–558. (in Chinese)
贾秀丽, 王晓鸥, 周忠祥, 等. 手性负折射率材料的最新进展[J]. 中国光学, 2015, 8(4): 548–558.
- [5] Yuan Wei, Zhang Jianqi, Qin Yuwei, et al. Near-infrared spectral region photonic crystal band gaps and KTP defect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 45(1): 0104005. (in Chinese)
- [6] Su An, Meng Chengju, Gao Yingjun. Modulation of activated impurity on filter property of photonic crystal quantum well [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0306001. (in Chinese)
苏安, 蒙成举, 高英俊. 激活性杂质对光子晶体量子阱滤波器特性的调制[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0306001.
- [7] Xu Jiangyong, Su An, Pan Jihuan, et al. Effect of double negative medium on the transmission spectra of onedimensional photonic crystal quantum well [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2156–2161. (in Chinese)
许江勇, 苏安, 潘继环, 等. 双负介质对一维光子晶体量子阱透射谱的影响 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2156–2161.
- [8] Su An, Gao Yingjun. Light propagation characteristics of one-dimensional photonic crystal with double-barrier quantum well [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(23): 234208. (in Chinese)
苏安, 高英俊. 双重势垒一维光子晶体量子阱的光传输特性研究[J]. 物理学报, 2012, 61(23): 234208.
- [9] Su An. The effect of lattice constants on transmission spectra of photonic crystal quantum well [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 200–206. (in Chinese)
苏安. 晶格常数对光子晶体量子阱透射谱的影响[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 200–206.
- [10] Chen Ying, Wang Wenyue, Fan Huiqing, et al. Achievement of multi-channel simultaneous adjustable filtering using hetero-structure photonic crystal cavities [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3399–3403. (in Chinese)
陈颖, 王文跃, 范卉青, 等. 异质结构光子晶体微腔实现多通道可调谐滤波 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3399–3403.