

相移光纤布拉格光栅的光子晶体理论研究

任国斌^{1,2}, 王 智¹, 姜淑琴¹, 简水生¹

(1. 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044; 2. 河北大学物理科学与技术学院, 河北保定 071002)

摘 要: 本文将相移光纤布拉格光栅近似为一维光子晶体, 利用光子晶体理论研究其能带结构和光学传输特性. 指出了光栅的反射峰和光子禁带, 反射峰中的高透射曲线部分和缺陷模之间的对应关系; 并研究了相移和缺陷模频率位置之间的关系.

关键词: 光纤布拉格光栅; 光子晶体; 禁带; 缺陷模

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 03-0421-04

On the Application of Photonic Crystals Theory for Investigating Phase-Shifted Fiber Bragg Gratings

REN Guo-bin^{1,2}, WANG Zhi¹, JIAN Shui-sheng¹

(1. Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Physics and Technology College, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China)

Abstract: The band structure and the transmission properties of the phase-shifted fiber Bragg grating were discussed in the scope of the photonic crystal. From the concept of photonic crystals, the reflection peak and the transmission peak in the band stop correspond to the photonic bandgap and defect mode respectively. The relation between the position of defect mode and the phase shifted was investigated.

Key words: fiber Bragg grating; photonic crystals; photonic bandgap; defect mode

1 引言

光子晶体的概念是由 Yablonovitch^[1]最早提出的. 光子晶体类似于我们熟悉的电子晶体: 电磁波在介电常数周期性变化的物质中传播时, 类似于电子的德布罗意波在具有周期性势场的电子晶体中的传播. 这种介电常数在空间周期性变化(周期和光波波长相近)的材料就称为光子晶体.

光子晶体最重要的特征是具有光子带隙, 在带隙频率范围内的光子在光子晶体内是被严格禁止传播的. 光子晶体的另一重要特性是具有光子局域性, 在光子晶体中, 如果周期性受到破坏, 在光子禁带中就会出现带宽极窄的缺陷模, 与缺陷模频率吻合的光子会被局域在出现缺陷的位置, 如果偏离缺陷位置光会呈指数衰减^[2]. 正是由于光子晶体的这些特性, 使得对于光子晶体的应用研究具有及其重要的意义.

由于光子晶体所具有的特性, 可以制作基于全新原理的以前不能制作的高性能器件, 如: 光子晶体波导、高性能反射镜、光子晶体光纤、微谐振腔、低阈值激光器、光开关、光放大、滤波器^[3~6]等新型器件.

光纤布拉格光栅(FBG)在光纤光学技术上有广泛的应

用. 例如作为全光纤滤波器, 应用光纤布拉格光栅可以实现波分复用光通信系统中对波长的选择. 单个 FBG 可以用作带阻反射滤波器, 但一般而言, 带通滤波器比带阻滤波器使用起来更方便, 因而更有应用价值. 相移 FBG 是通过在 FBG 上引入一个相移而形成的一个法布里-伯罗滤波器, 其腔的长度(相移)小于一个布拉格波长. 相移光纤光栅可以应用于分布反馈光纤激光器^[7]、多信道光通信系统中的全光纤解复用器^[8]等.

本文将相移光纤布拉格光栅近似为一维光子晶体, 利用光子晶体理论研究了其能带结构和光学传输特性.

2 光子晶体的理论研究方法

在电子晶体材料中, 反映电子运动的波函数满足薛定谔方程, 由于存在原子的周期性势场, 导致电子的能量分立, 从而形成能带、价带、导带、禁带等物理概念. 同样, 当光子(电磁波)在光子晶体中传播时, 由于介电常数的周期性调制, 也会使光子的能级分立, 对应于光子频率的分立, 在频域上出现能带结构, 相邻能带之间形成光子带隙 (FBG: Photonic Band Gap).

和电子不同, 光子在光子晶体中的运动服从 Maxwell 方

程. 假如介质是无源、无耗、线性和各向同性的, 经过推导可以得到本征方程式^[2]:

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times \right] H(r) = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 H(r) \quad (1)$$

其中, $\epsilon(r)$ 为介电常数, 它随空间位置做周期性变化, c 为真空中的光速, ω 为电磁波的频率, $H(r, t)$ 是电磁波的磁场强度. 通过解上述本征方程, 就可以得到光子晶体的能带结构.

常用的计算能带结构的方法有: 平面波法, 球面波 (矢量 KKR) 法, 有限时域差分法, 转移矩阵法, 多重散射法^[9-12] 等. 由于转移矩阵法既可以计算能带结构又能得到其传输特性, 在研究相移光纤布拉格光栅近似的一维光子晶体时, 我们采用转移矩阵法.

3 均匀光纤光栅近似一维光子晶体理论分析

图 1 左侧是在普通单模光纤 (SMF) 的纤芯上利用紫外光技术写入的均匀光栅的示意图, 阴影区是感光后的高折射率区. 光通信用的 FBG 的光栅周期一般为 0.55 微米左右, 光纤芯层直径一般为 9.0 微米, 如果不考虑包层对光栅的影响, 由于芯层直径远大于光栅周期, 所以光纤布拉格光栅就可以近似为一维光子晶体, 如图 1 右侧所示. 对于周期比较长的光栅, 如长周期光栅 (周期达 400 微米), 这种近似不能成立, 因此本文只限于研究短周期的均匀光纤布拉格光栅.

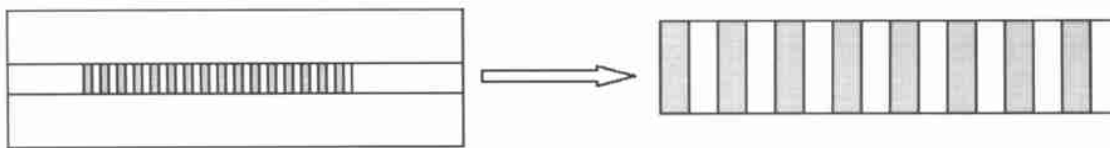


图 1 均匀光纤布拉格光栅近似为一维光子晶体

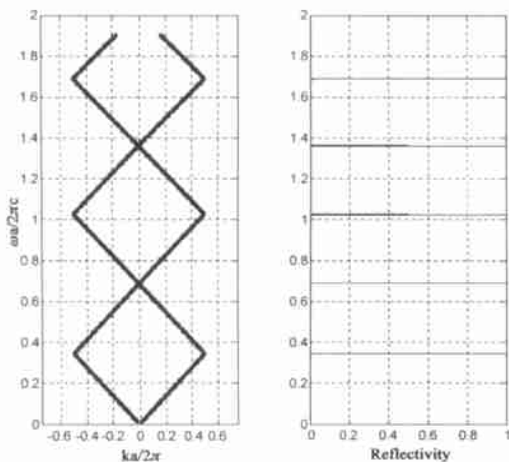


图 2 均匀光纤布拉格光栅的能带结构与反射谱

4 用光子晶体理论研究相移光纤布拉格光栅

在制作过程中, 如果在光纤光栅上引入一个或多个相移, 就可以改变其传输特性. 在光栅的反射峰中出现一个极窄的透射窗口, 透射波长由相移量的大小来控制.

由于光纤布拉格光栅可以近似为一维光子晶体, 在光纤

SMF 光纤的芯层介电常数一般为 2.10, 紫外写入光栅后, 感光区折射率受到轻微调制, 调制深度一般为 $10^{-3} \sim 10^{-5}$, 本文中调制后的介电常数取 2.103, 于是 FBG 就近似为介电常数分别为 2.103 和 2.10 两种介质交替构成的一维光子晶体. 图 2 为均匀光纤布拉格光栅的能带结构和反射谱. 图 2 左边为光栅的能带结构, 横坐标为归一化波矢 $ka/2$, 其中 a 为晶格常数即光栅周期; 右边为光栅的反射谱横坐标为反射率; 两图的纵坐标都是归一化频率 $\omega a/2c$. 我们看到在光纤光栅的能带结构图中, 布里渊区的中心和边缘都对应着光纤光栅的一个高反射峰, 即在能带结构的这些位置都存在光子禁带. 高反射峰的出现意味着这个频率处于光子晶体的光子禁带之中. 这五个归一化频率位置分别为: 0.3442、0.687、1.027、1.361、1.689, 它们分别对应于第一、第二……第五光子禁带, 也可以认为是基频、二次频……等.

为了细致观察图 2 中光子禁带处的带结构, 我们分析了第一光子禁带处的带结构和相应的反射谱, 如图 3 所示. 计算时所选定的参数为: 光纤光栅长度为 2.19mm, 光栅周期 $\Lambda = 0.5336\mu\text{m}$, 折射率调制的占空比为 5:5. 图 3 中, 为了方便比较, 我们选取纵坐标为波长 (nm), 可以看到能带结构在布里渊区的边缘出现了断裂, 从而形成了光子禁带 (1549.59 - 1550.25nm), 其中心波长为 1549.94nm, 带宽为 0.66nm. 反射率达到 1. 这一结果与传统的光栅耦合模理论和实验一致^[13].

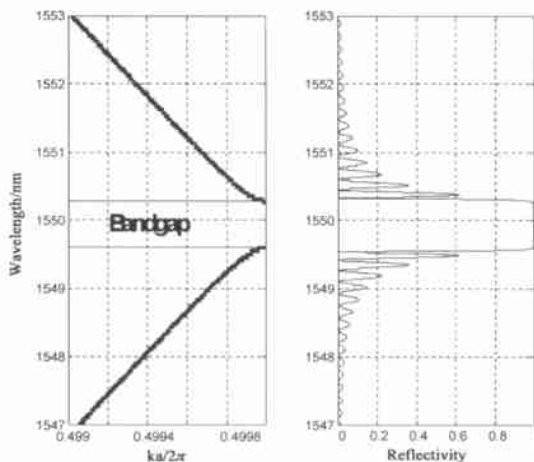


图 3 第一光子禁带处的能带结构与反射谱
光栅上引入一个相移实际上是在一维光子晶体中引入一个缺陷. 如图 4 所示.



图 4 相移光栅近似为包含缺陷的一维光子晶体

图 5 是我们得到的相移光纤光栅即存在缺陷的一维光子晶体的反射谱. 所选的参数为: 光纤光栅长度 4.38mm , $\Lambda = 0.5336\mu\text{m}$, 缺陷(相移)的位置在光栅的中心, 取缺陷的介电常数为 2.1 , 相移量为 $\pi/2$. 图 5 中反射峰被一条极窄的透射线(线宽约为 0.004nm)分为带宽相等的两部分, 透射线的位置在 1549.942nm 处. 由于高反射峰对应的是光子晶体的光子禁带, 所以相移光栅的光子禁带仍然存在, 不同的是由于这条透射线的出现使光子禁带中出现了缺陷模. 由于透射峰的线宽极窄, 受计算精度的限制, 我们不给出光子禁带中的缺陷模的谱图.

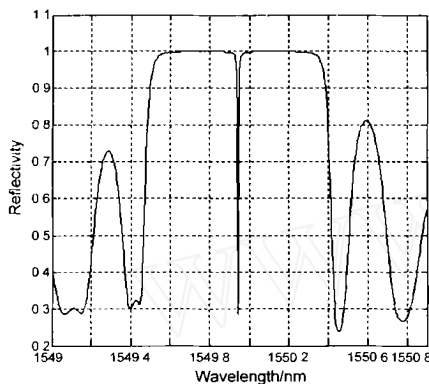


图 5 相移光纤布拉格光栅的反射谱

相移量决定了光子禁带中缺陷模的位置, 图 6 是光子禁带中缺陷模的位置随相移量变化的曲线. 我们注意到, 曲线是周期性的, 周期为 π . 相移量从 0 到 π 变化时, 缺陷模将从短波长向长波长扫过整个禁带. 当相移量趋近 0 或 π 时, 缺陷模将移出光子禁带(此时, 禁带的边缘将发生微小的位移). 在禁带的中间部分, 曲线是线性变化的, 而在禁带边缘曲线呈非线性变化. 我们可以在光纤光栅上通过控制相移量来选择缺陷模(高透射峰)的位置, 以满足实际需要. 由于在光栅(一维光子晶体)中含有缺陷, 那么缺陷模就会存在于缺陷的位置上, 形成光的局域化^[14]. 即在光栅中缺陷的位置处, 缺陷模频率的光场最强, 并随离开缺陷的距离作指数衰减. 因为光栅的周期数量非常大, 其调制深度又较小, 所以光的局域化效应并不明显.

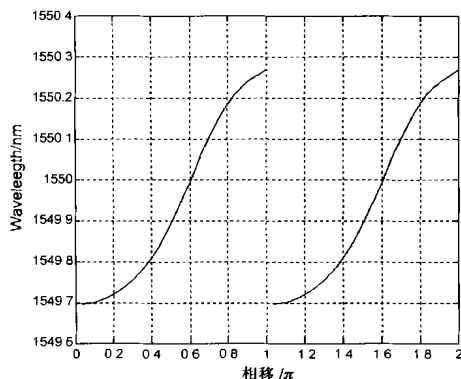


图 6 缺陷模位置与相移量的关系

相移(缺陷)在光栅中的位置并不影响缺陷模频率的位置. 从透射谱上来看, 缺陷位置的变化只会影响透射峰的高度. 规律是随着缺陷偏离中间位置距离的增大, 透射峰的高度降低. 因为篇幅所限, 本文不给出相应的谱线.

如果在光纤光栅上引入多个相移, 其反射谱将进一步发生变化. 图 7 是引入两个相移(缺陷)的光纤光栅的反射谱. 其参数为: 光栅长度 $L = 6.57\text{mm}$, 两个缺陷处的相移量都为 $\pi/2$, 缺陷分别位于光栅长度的 $1/3L, 2/3L$ 处. 图 7 中, 在反射谱的中心(1549.942nm)处出现了两条极窄的透射峰(B和C), 两峰的间距为 0.032nm . 这就是说, 如果在光栅上引入两个缺陷, 那么在其对应的光子禁带中, 就会出现两个缺陷模. 这两个缺陷模的中心位置(用A点表示)与缺陷处的相移量有关, 缺陷模的间距(B与C的间距)与各段光栅的长度比有关^[15]. 这里我们仅考虑当两缺陷的相移量相同、均匀分布时, 相移量与两个缺陷模的中心位置A点的关系. 分析发现, A点位置和相移量的关系与只有一个缺陷的光栅相同, A点的位置由相移量决定, 其关系也可以用图6来表示. 通过调整相移量和各段光栅的长度比可以使我们在光子禁带内按需要设计缺陷模(透射峰)的位置.

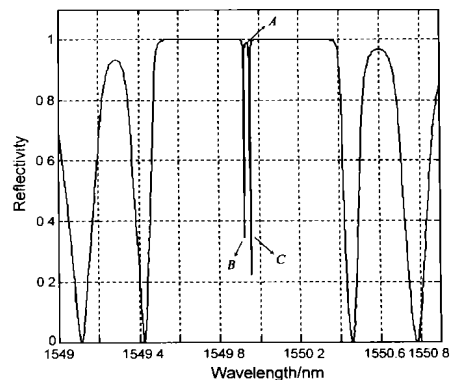


图 7 存在两个相移的光纤光栅的反射谱

5 结论

本文从光子晶体的角度对相移光纤布拉格光栅进行了研究. 指出均匀光纤光栅的反射谱对应于其能带结构中的禁带, 处在禁带频率范围内的光将被全部反射, 不能沿光栅传输. 对相移光栅, 光纤光栅的相移部分相当于光子晶体的缺陷, 由此得到相移光栅反射峰中的高透射曲线部分反映了光子禁带中缺陷模的存在, 进而研究了缺陷模在光子禁带中随相移量以及缺陷(相移)位置变化的规律.

参考文献:

- [1] Eli Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059 - 2062.
- [2] J D Joannopoulos, R D Meade, J N Winn. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light [M]. New York: Princeton University Press, 1995.
- [3] S Y Lin, E Chow, V Hietala, P R Villeneuve, J D Joannopoulos. Experimental demonstration of guiding and bending of electromagnetic waves in a photonic crystal[J]. Science, 1998, 282: 274 - 276.

- [4] 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 Tech ,1999 ,17 (11) :2018 - 2024.
- [5] J C Knight ,J Broeng ,T A Birks ,P St J Russell. Photonic band gap guidance in optical fibers[J]. Science ,1998 ,282:1476 - 1478.
- [6] J C Knight ,P St J Russell. New way to guide light[J]. Science ,2002 ,296 :276 - 277.
- [7] W H Loh ,R I Laming. 1.55 μ m phase-shifted distribute feedback fibre laser[J]. Electro Lett ,1995 ,31 (17) :1400 - 1442.
- [8] G P Agrawal ,S Radic. Phase-shifted fiber bragg gratings and their applications for wavelength demultiplexing[J]. IEEE Photo Technol Lett ,1994 ,6 :995 - 997.
- [9] K Sakoda. Optical properties of photonic crystals [M]. Heidelberg : Springer ,2001.
- [10] M Kafesaki ,M M Sigalas ,N Garcia. The finite difference time domain method for the study of two dimensional acoustic and elastic band gap material[A]. Photonic crystals and light localization in the 21st century [C]. Boston : Kluwer Academic Publishers ,2001 . 69.
- [11] J B Pendry. Calculating photonic band gap structure[J]. J Phys ,1996 ,8 :1085 - 1108.
- [12] Jun Yonekura ,Mitsutaka Ikeda ,Toshihiko Baba. Analysis of finite 2D photonic crystals of columns and lightwave devices using the scattering matrix method[J]. J Lightwave Tech ,1999 ,17 (8) :1500 - 1508.
- [13] R Kashyap. Fiber Bragg Gratings[M]. London :Academic Press ,1999.
- [14] 顾国昌 ,李宏强 ,陈洪涛 ,等. 一维光子晶体材料中的光学传输特性[J]. 光学学报 ,2000 ,20 (6) :728 - 734.
- [15] R Zengerle ,O Leminger. Phase-shifted bragg-grating filters with improved transmission characteristics[J]. J Lightwave Technol ,1995 ,13 (2) :2354 - 2358.

作者简介 :



任国斌 男,1973 年 1 月生于河北献县,在读博士,主要从事非线性光纤光学、新型光纤和光子晶体光纤的研究工作。

王 智 男,1971 年 11 月生于湖北蕲春,北方交通大学副教授,主要从事光纤通信、非线性光纤光学、新型光纤和光纤工艺的研究工作。