

二维介质柱光子晶体波导吸收边界条件*

张 波

(北京交通大学电子信息工程学院, 国家电工电子教学基地, 北京 100044)

(2005 年 1 月 25 日收到, 2005 年 6 月 6 日收到修改稿)

设计优化了用于截断二维正方格子介质柱光子晶体波导的分布布拉格反射波导的结构. 二维时域有限差分模拟结果显示, 在上述两种波导联接处的反射系数可以在大部分光子晶体波导的频谱范围内降到 1% 以下. 将这种分布布拉格反射波导和通常的吸收边界条件相结合可以构成用于光子晶体波导的吸收边界条件, 其反射率可以降低到 -40 dB 以下, 吸收层的厚度可取为晶格长度的 1.3 倍.

关键词: 吸收边界条件, 光子晶体波导, 时域有限差分

PACC: 4270Q, 4280L

1. 引 言

光子晶体波导传输特性的研究是当今世界的热门研究课题, 由于其可以在光波波长的尺度上调控光的传输特性, 在未来的集成光电子领域内具有非常诱人的应用前景^[1]. 在光子晶体波导传输特性的研究中, 时域有限差分 (FDTD) 方法是很有效的数值仿真工具^[2,3], 它要求传播到计算区域边界的光波必须被吸收掉. 完全匹配层 (PML) 是常用的吸收边界条件, 如 Berenger^[4]指出, PML 的反射率可以低到 -80 dB. 然而, 这种常规的吸收边界条件仅仅适用于截断具有连续平移对称性的波导结构, 例如分布布拉格反射 (DBR) 波导, 而应用到截断介质柱光子晶体波导上效果并不理想, 剩余反射系数高于 20%. Mekis 等^[5]提出了适用于光子晶体波导的基于 DBR 波导吸收边界条件, 将光子晶体波导终端的反射系数降到了 1%—10%. 但是, 1% 以上的剩余反射系数对于一些精度要求较高的模拟而言仍嫌过高, 它会在功率谱曲线上产生寄生纹波. 最近 Koshiba 等^[6]提出了基于光子晶体的 PML, 将光子晶体波导端口的反射系数降到了 0.1% 的量级. 这种 PML 是将通常的各向异性 PML 延伸到光子晶体内部而构成, 其缺点是吸收层的厚度相当大, 约为晶格长度的 10 倍, 用于仿真时需要花费相当多的额外计算机资源. 在本文中, 我们改进了 DBR 波导结

构, 在原有的 DBR 波导中插入两对介质板, 通过调节组成 DBR 波导的各个介质板的折射率以及与光子晶体波导间的相对位置, 我们可以在大部分光子晶体波导的频谱范围内, 将光子晶体波导和 DBR 波导接口处的反射系数降到 1% 以下. 并且, 由这种 DBR 波导和 PML 所构成的吸收边界层的总厚度可以小到晶格长度的 1.3 倍. 这种针对二维光子晶体波导的吸收边界条件可以在二维光子晶体波导的 FDTD 仿真模拟中节省大量的计算机资源.

2. 结构和 FDTD 仿真结果

图 1 为 Mekis 等^[5]提出的基于 DBR 波导的吸收边界条件. 图 1 中, 光子晶体由周期性排列的正方格子介质圆柱构成, 晶格长度为 a , 介质圆柱的折射率 $n = 3.4$, 半径 $r = 0.20a$. 将光子晶体中的一排介质柱取出就构成了光子晶体波导. DBR 波导是将相互平行周期性放置的介质平板 D 中位于中间的一块取出而构成, 我们取介质平板的折射率 $n_D = 3.194$, 厚度 $t = 0.25a$, 介质板左端和右端与光子晶体中最右一列介质圆柱圆心的连线之间的距离分别用 Δ_D 和 L 表示. 在 DBR 波导的右端用厚度为 $0.5a$ 的常规 PML 截断 (DBR 波导结构需延伸到 PML 内部). 我们用二维 FDTD 方法对光脉冲在波导中的传播行为进行了仿真, 仿真区域长 $51a$, 宽 $11a$, FDTD 网格尺寸为 $0.05a \times 0.05a$. 在本文中, 我们仅讨论 TE 极

* 北京交通大学人才基金 (批准号 2003RC068) 资助的课题.

化 (E 平行于介质柱), 因为我们所考虑的介质柱光子晶体波导对于 TE 极化有很宽的禁带. 考虑到光子晶体波导色散严重, 如果输入脉冲频谱过宽, 由色散引起的脉冲展宽将造成反射脉冲和输入脉冲重叠. 为了将反射脉冲与输入脉冲分离, 我们在光子晶体波导的左端输入两个载频分别为 $\omega_1 = 0.350(2\pi c/a)$ 和 $\omega_2 = 0.380(2\pi c/a)$ 的窄频谱带宽高斯脉冲, 使得在输入脉冲的频谱范围内, 群速度的差异不至于过大^[7]. 测量面距光子晶体波导左端 $5a$, 宽度为 $8a$, 将测量面上的坡印亭矢量进行傅里叶变换, 并进行面积分得到功率谱 $P(\omega)$. 将反射波的功率谱 $P_r(\omega)$ 用入射波的功率谱 $P_0(\omega)$ 进行归一化并开方, 得到反射系数 r 随频率的变化关系, 即

$$r = \sqrt{P_r(\omega)/P_0(\omega)}.$$

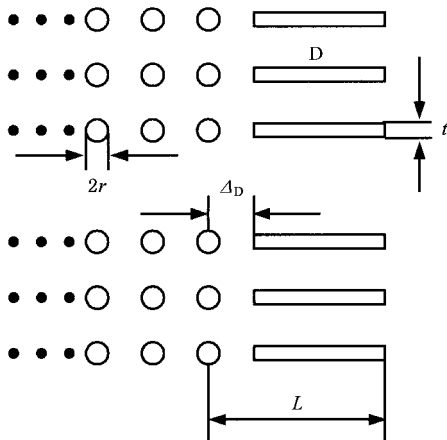


图 1 光子晶体波导和用于截断该波导的 DBR 波导

图 2 为采用图 1 所示结构, 在参数 Δ_D 取三个不同的数值时由仿真得到的反射系数随频率的变化关系曲线. 从图 2 可以看出, 在所给出的频谱范围内, 反射系数约在 1%—10% 之间, 且对参数 Δ_D 的变化比较敏感. 特别是当 $\Delta_D = 0.41a$ 时, 在频率 $\omega = 0.33(2\pi c/a)$ 处出现了一个低反射谷, 谷区的反射系数降到 1% 以下. 可是, 这种低反射区的频谱带宽很窄, 其实用范围受到了限制.

一般认为, 在两个不同波导交界面处产生的反射主要是由于在两个波导中导波的色散关系和模场失配而造成^[5]. 因此, 我们对前述的 DBR 波导结构作了改进: 在 DBR 波导的内侧和外侧关于波导中线对称地插入两对介质平板 A 和 B, 用以调节 DBR 波导的色散关系, 如图 3 所示. 图 3 中, 各个介质平板的厚度都为 $t = 0.12a$, 构成 DBR 波导的各类介质平

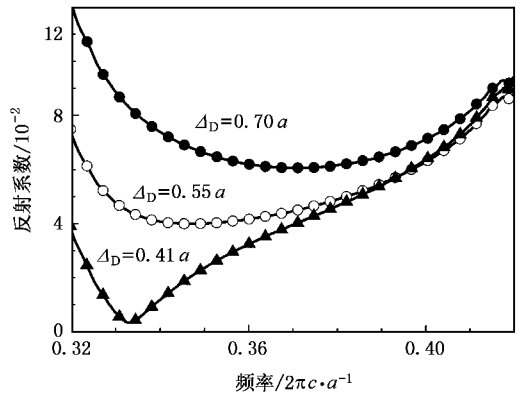


图 2 用 DBR 波导截断的光子晶体波导终端的反射系数二维 FDTD 仿真结果

板 A、B 和 D 的折射率分别用 n_A 、 n_B 和 n_D 表示; 各个介质平板左端与光子晶体中最右一排介质柱圆心连线的距离分别用 Δ_A 、 Δ_B 和 Δ_D 表示; L 则是 DBR 波导右端到圆心连线的距离.

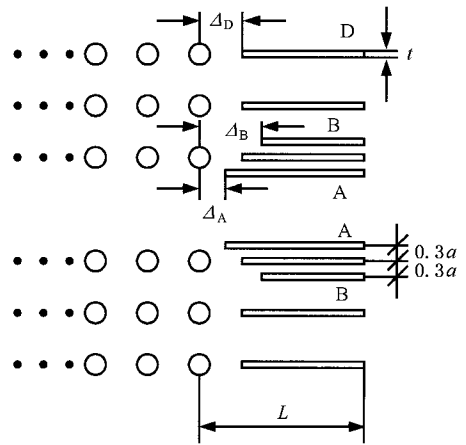


图 3 改进后用于截断光子晶体波导的 DBR 波导结构

通过对图 3 中 DBR 波导的参数进行优化, 我们在大部分的光子晶体波导的频谱范围内将光子晶体波导端口的反射系数降到 1% 以下. 图 4 给出了光子晶体中介质柱的半径和折射率分别取 $r = 0.2a$, $n = 3.4$ 时, 对 DBR 波导参数进行优化所得到的结果. 图 5 和图 6 分别为 r 取 $0.18a$ — $0.23a$, $n = 3.4$ 和 $r = 0.2a$, n 取 3.2 — 3.8 时, DBR 波导参数的优化结果.

光子晶体波导和 DBR 波导连接处的反射系数由二维 FDTD 仿真获得. 经过多次尝试, 我们注意到在组成 DBR 波导的介质板的折射率 n_A 、 n_B 和 n_D 及位置参数 Δ_A 、 Δ_B 和 Δ_D 取某些值时, 在相当宽的频

谱范围内出现了两个低反射谷, 并且, 反射系数可以在大部分光子晶体波导导波的频谱带宽内降至 1% 以下, 如图 4 所示. 其中介质柱的半径 $r = 0.2a$, 折射率 $n = 3.4$, DBR 波导参数的取值为 $\Delta_D = 0.405a$, $\Delta_A = 0.10a$, $\Delta_B = 0.63a$, $L = a$, $n_D = 3.08$ 和 $n_B = 1.55$. 在图 4 中, 给出了 n_A 取四个不同的数值时, 反射系数随频率的变化关系曲线.

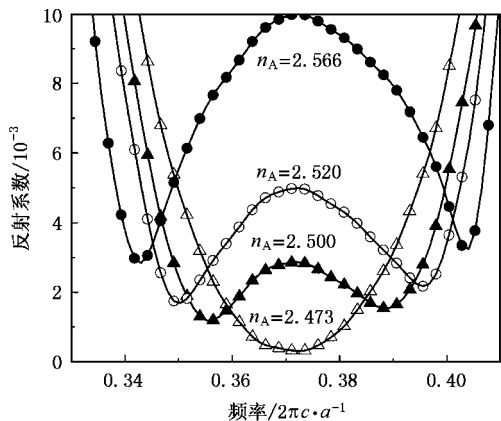


图 4 用改进后的 DBR 波导进行截断的光子晶体波导端口的反射系数随频率变化关系曲线

当 $n_A = 2.566$ 时, 反射系数低于 1% 的频谱范围为 $0.334(2\pi c/a) - 0.410(2\pi c/a)$, 并且出现了两个低反射谷. 随着参数 n_A 的减小, 曲线中部下降, 而两边上升. 同时, 两个谷底的高度下降并相互趋近. 由图 4 可见, 我们可以牺牲频率带宽为代价, 得到更低的反射系数. 例如, 当取 $n_A = 2.520$ 时, 在相对较窄的频谱范围 $0.343(2\pi c/a) - 0.402(2\pi c/a)$ 内, 反射系数降到了 0.5% 以下. 如果取 $n_A = 2.500$, 反射系数可以在更窄的频率范围 $0.349(2\pi c/a) - 0.396(2\pi c/a)$ 内降到 0.3%.

我们还通过 FDTD 仿真得到了反射系数对 DBR 波导长度 L 的依赖关系, 结果表明, 只要 $L > \max(\Delta_A, \Delta_B, \Delta_D)$, 反射系数对 L 的变化不敏感. 我们可以取 DBR 波导的长度为 $L = 0.8a > \Delta_B$, 在加上常规吸收层的厚度 $0.5a$, 这样, 基于 DBR 波导的吸收层总厚度可以取为 $d = L + 0.5a = 1.3a$.

我们还考虑了光子晶体中介质柱的半径 r 或折射率 n 分别取不同数值时, 相应的 DBR 波导结构参数的变化关系. 结果表明, 当 r 或 n 的变化范围不是很大时, 可以将某些结构参数取为随 r 或 n 线性变化. 通过调节其余的参数, 就可以在相当宽的频谱范围内, 将反射系数降到 1% 以下. 图 5 给出了介质柱

折射率为 $n = 3.4$ 时, 半径 r 取 $0.18a - 0.23a$ 时, 使得反射谱中部的反射系数小于 1% 的 DBR 波导结构参数随介质柱半径 r 的变化关系. 图 5(c) 为相应的反射谱, 其反射系数小于 1% 的频谱范围至少达到光子晶体波导导波频带宽度的 2/3 以上.

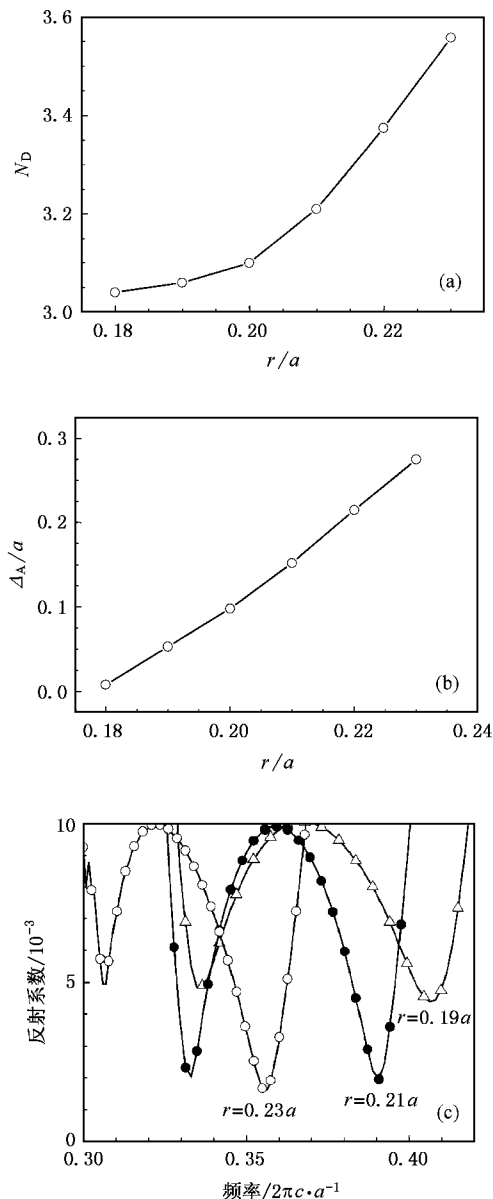


图 5 光子晶体中介质柱的折射率 $n = 3.4$ 时, 取反射谱中部的反射系数小于 1% 而得到的 DBR 结构参数随半径 r 的变化关系及反射谱 $n_A = 2.536$, $n_B = 1.60$, $\Delta_B = 1.508a - 4.4r$, $\Delta_D = 0.423a - 0.1r$. (a) n_D 随 r 的变化关系 (b) Δ_A 随 r 的变化关系, (c) 相应的反射系数随频率的变化关系

图 6 给出了光子晶体介质柱的半径取 $r = 0.2a$ 时, 折射率 n 取 $3.2 - 3.8$ 时, DBR 波导结构参数随介质柱折射率 n 的变化关系. 图 6(d) 为相应的反射

谱 其反射系数小于 1% 的频谱范围至少达到光子

晶体波导频带宽度的 1/2 以上.

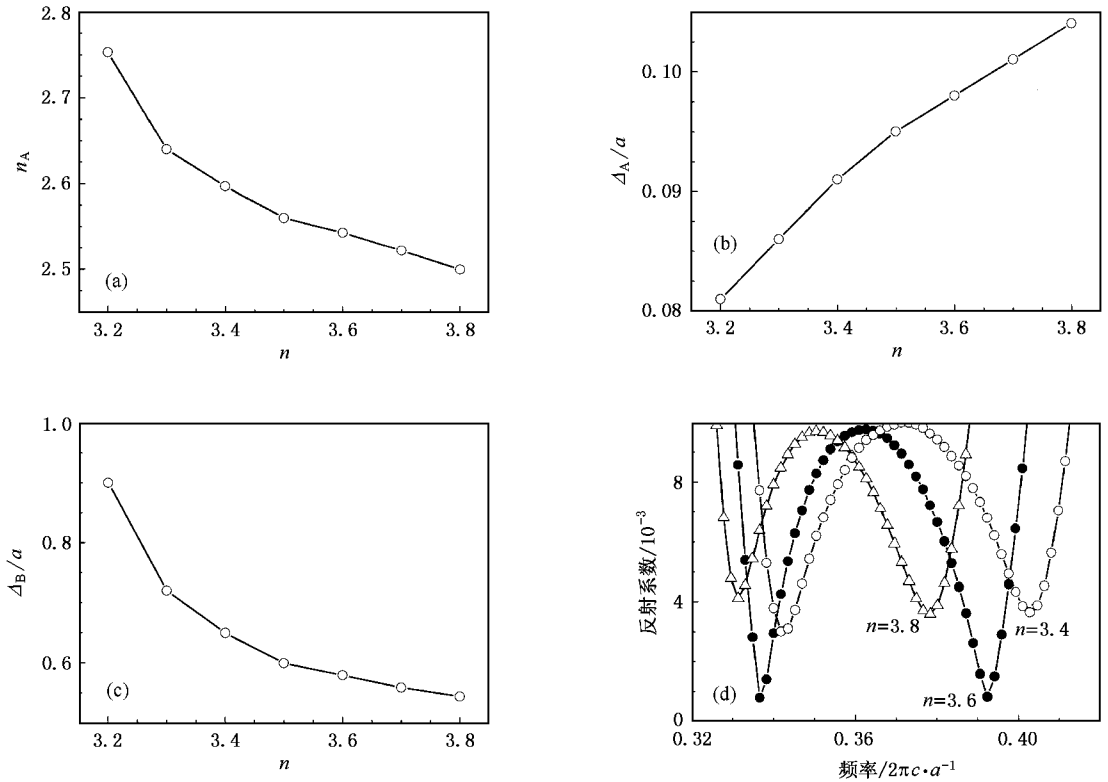


图 6 光子晶体中介质柱的半径 $r = 0.2a$ 时 取反射谱中部的反射系数小于 1% 而得到的 DBR 结构参数随介质柱折射率 n 的变化关系及反射谱 $n_B = -1.591 + 0.939n$, $n_D = 2.574 + 0.14n$, $\Delta_D = 0.4a$. (a) n_A 随 n 的变化关系 (b) Δ_A 随 n 的变化关系 (c) Δ_B 随 n 的变化关系 (d) 相应的反射系数随频率的变化关系

3. 讨 论

涉及有关光子晶体波导和其他波导连接的反射和透射问题的解析或半解析理论是当今的热点课题. 如果假定两个波导之间的分界面是平面, 则在光子晶体波导连接处引起的反射主要有两个因素^[5]: 波导导模间的色散关系失配和模场失配.

图 7 为由平面波展开方法得到光子晶体波导和改进后的 DBR 波导的色散关系随频率的变化关系曲线. 其中 DBR 波导的结构参数和图 4 中 $n_A = 2.473$ 的曲线所采用的参数一样. 在频谱范围 $0.305(2\pi c/a) - 0.421(2\pi c/a)$ 内, 光子晶体波导是单模的, 而 DBR 波导是多模的. 光子晶体导模与 DBR 基模的色散关系曲线在高频端符合得比较好, 而在低频端差异明显. 我们虽然可以通过调节波导参数使得 DBR 基模的色散关系曲线与光子晶体波导的色散关系曲线重合, 但难以同时使得它们的模场分布相同. 所以, 仅由基模的色散关系匹配为条件进行优化得到的结果

不是十分理想. 在我们所考虑的结构(图 3)中, 波导分界面不再是平面, 这种非平面分界面将会对模场分布产生显著的扰动. 在透射波中, 将会出现较强的高阶模式分量以及辐射模式分量. 这样, 由假定在透射波中仅有基模而得到的消反射所要求的色散关系

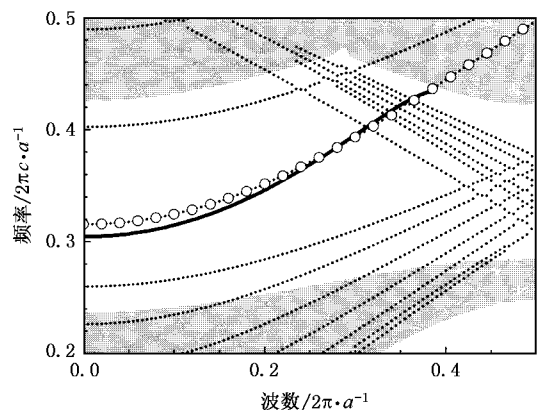


图 7 介质柱光子晶体波导(实线)和改进后的 DBR 波导(虚线)的色散关系曲线(Te 模) DBR 波导基模的色散关系曲线用空心圆表示

和模场匹配条件就不再需要严格满足.

图 8 为波导中的电场 $|E_y|$ 分布图, 波导参数取和图 4 中 $n_A = 2.473$ 的曲线所采用的参数一样. 使用频率为 $0.37\lambda (2\pi c/a)$ 的连续波进行激励. 在此种情况下, 波导端口的反射系数极低, 仅为 3×10^{-4} .

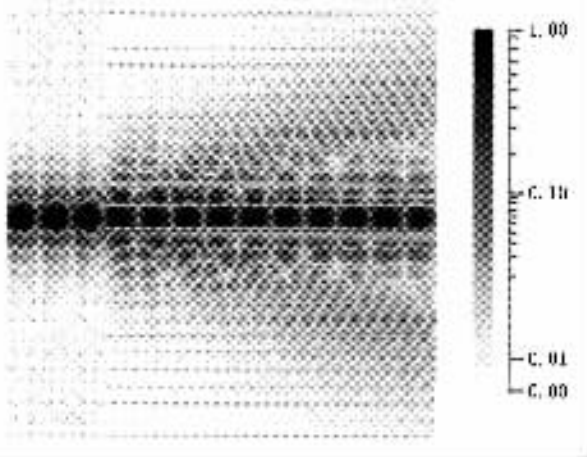


图 8 波导内的电场 $|E_y|$ 分布图 y 轴与介质柱轴线平行

从图 8 可以看到, 当光波由光子晶体波导进入到 DBR 波导后, 电场分布展宽, 并可看到波导连接端口引起的衍射现象, 同时, 高阶模式分量有相当的贡献. 我们的 FDTD 仿真结果表明, 通过适当地选取 DBR 波导的结构参数, 可以使得光波几乎无反射地从光子晶体波导输入到 DBR 这样的传统波导内.

4. 结 论

在本文中, 我们设计改进了用于截断正方格子介质柱光子晶体波导的 DBR 波导结构, 与常规的 PML 相结合构成了适用于光子晶体波导的吸收层, 可在大部分导波频谱带宽内, 将光子晶体终端的反射系数降到 1% 以下. 在较窄的频谱带宽内, 反射系数甚至可以降到 0.3% 以下. 这种吸收层的厚度比基于光子晶体的 PML 要薄得多, 可以节省进行 FDTD 仿真所需的计算机资源, 特别适用于那些需要大量循环的结构优化设计过程, 例如超低反射的光子晶体弯头^[8]等.

- [1] Joannopoulos J D, Villeneuve P R, Fan S 1997 *Nature* **386** 143
 [2] Zhuang F, Wu L, He S L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2167 (in Chinese) [庄 飞、吴 良、何赛灵 2002 物理学报 **51** 2167]
 [3] Feng Z F, Wang Y Q, Xu X S *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 62 (in Chinese) [冯志芳、王义全、许兴胜等 2004 物理学报 **53** 62]
 [4] Berenger J P 1994 *J. Comput. Phys.* **144** 185

- [5] Mekis A, Fan S, Joannopoulos J D 1999 *IEEE Microw. Guided Wave Lett.* **9** 502
 [6] Koshiha M, Tsuji Y, Sasaki S 2001 *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* **11** 152
 [7] Mekis A, Chen J C, Kurlang I *et al* 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 3787
 [8] Jensen J S, Sigmund O 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 2022

Absorbing boundary conditions for two-dimensional photonic crystal waveguides^{*}

Zhang Bo

(*National Teaching Base of Electrical and Electronics , School of Electronics and Information Engineering ,
Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 , China*)

(Received 25 January 2005 ; revised manuscript received 6 June 2005)

Abstract

We designed a distributed Bragg reflector waveguide for terminating the square lattice dielectric cylinder photonic crystal waveguide and evaluated the reflection of their interface numerically. The reflection coefficient was reduced to below 1% in a large part of the frequency range of the guided mode.

Keywords : absorbing boundary conditions , photonic crystal waveguides , finite difference time domain

PACC : 4270Q , 4280L

^{*} Project supported by the Foundation of Talents Program of Beijing Jiaotong University , China (Grant No. 2003RC068).