

文章编号:1671-6833(2008)04-0006-04

基于二维光子晶体薄膜板的天线补偿材料及结构设计

李彬¹, 李桂仁², 周锡增³, 顾晚仪¹

(1.北京邮电大学 光通信与光波技术教育部重点实验室,北京 100876;2.亚东技术学院 通讯工程系,台湾省台北县板桥市四川路二段58号,台湾 22061;3.元智大学 通讯研究中心,台湾省桃园县中坜市远东路135号,台湾 32003)

摘要:根据二维光子晶体的周期性结构对于移动通信中的天线信号进行补偿,对电磁波而言,在介质中传播,所遇介电常数反差如同电子在晶体中的周期性位势.基于电子束微影法通过光阻进行基板蚀刻技术经曝光显影后所制成的金属氧化物补偿材料压制成薄膜结构,利用二维光子晶体所形成的周期性排列结构,制作薄膜材料,对射频电波进行滤波.在介质层表面的电场分布可以通过边界条件求得,对材料表面的TE波及TM波分别进行分析.通过常用材料及成熟的制造技术实现传统的光学晶体补偿结构,减少天线在不同方向上所形成的偏差,并增强相应的极化透射强度.

关键词:光子晶体;极化滤波;薄膜材料

中图分类号: O 484.4 **文献标识码:** A

0 引言

目前光子晶体的应用主要集中于光子晶体波导^[1]、薄膜滤波器^[2]、以及纳米小球光子晶体的可调式与非线性光子晶体结构等^[3].国外学者曾经用光子晶体雷射来提高LED的发光效率,通过留下一个晶格缺陷来透光,使得所有的能量集中于一个方向发出,利用一些原本无法利用的能量.同时还有一些可调元件的制造如光子晶体耦合器来实现光开关,或者通过光子晶体分光器建立马赫-曾德尔干涉仪,在光通讯中得到广泛的应用^[4].在无线通信中,由于波长、尺寸等多方面的限制,相关的研究较少.二维光子晶体通过周期性孔状或者柱形结构排列,笔者则利用光子晶体的带阻特性来控制电波的导向,从而增强天线在不同角度上的方向性,可以在一个方向上部分抑制一个模式;而在平面角的另一个垂直方向则可以抑制掉两个模式,从而实现电波极化滤除的功能.

1 光阻补偿板结构

二维光子晶体的周期性结构主要分为两大类,第一类为周期性排列的凸柱,第二类为周期性排列的孔洞.两种对偶结构所形成的周期结构使电磁波

局限在波导中的极化方向会有所不同,第一类光子晶体中,和凸柱平行的方向上存在明显的光子能隙^[5],在第二类光子晶体中,和表明平行的电磁波极化方向在光子晶体中比较容易得到光子能隙^[6].第一类光子晶体的结构通常通过车床将 Al_2O_3 制成柱状,再将其排列整齐,由于没有上下约束边界层且制造工艺相对复杂,所以在实际的元件制造中很少使用.通过电子束微影法制成所需要的二维周期性结构,通常电子束微影机内部会包含具有高精度的移动平台.通过电脑控制电子显微镜的电子束与移动平台,将表面镀上会被电子束曝光的光阻放入电子束微影机.所需要的pattern通过电子束进行绘制,按照pattern的形状以扫描的方式,利用电子束进行曝光显影,将光阻板进行蚀刻,渗透至基板上相应的蚀刻图案.

在电子束进行曝写显影时需要注意由于电子束聚焦在光阻板上时,由于发生透射时部分电子会由于光阻分子的影响发生折射而改变透射的方向,或者由于后向散射效应而偏离所需要蚀刻的方向^[7],因此在实际制作时需要将光阻板的孔径适当的缩小,从而得到更接近预先所设计的显影后的线宽.补偿用途的二维光子晶体结构采用最为常见的 Al_2O_3 材料作为补偿基板结构材料,具体制作过程从图1

收稿日期:2008-09-10;修订日期:2008-10-11

基金资助:国家“863”计划资助项目(2006AA01Z246);台湾国科会计划资助项目(NSC-97-2218-E-161-002)

作者简介:李彬(1965-),男,北京人,北京邮电大学博士研究生,E-mail:direfish1983@gmail.com.

中可以看出,通过光阻板完成基板蚀刻的完整过程.

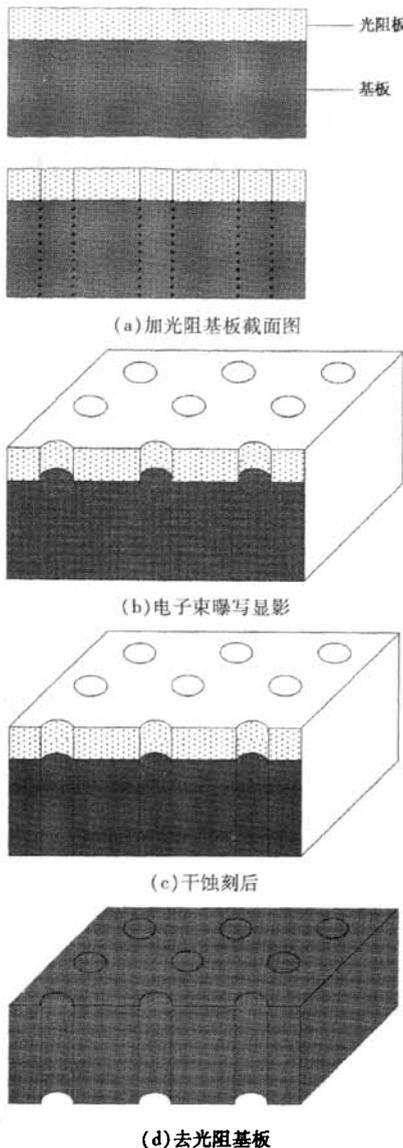


图1 补偿基板制作方法

Fig.1 Fabrication of the substrate

2 周期性结构分析

对于晶格常数为 a 的光子晶体结构可以用一个周期函数 $f(x)$ 来表示, $f(x)$ 应当满足 $f(x+a) = f(x)$, 由傅立叶展开理论可知, $f(x)$ 可以表示为 $\sum_c C(G) \exp(iGx)$ 的形式, 其中 G 为一组特殊参数集合, 而 $C(G)$ 为对应参数 G 的系数. 通常 G 取倒晶格矢量的线性组合, 为满足周期性条件, G 需要满足:

$$\exp(i\vec{G} \cdot \mathbf{a}_1) = \exp(i\vec{G} \cdot \mathbf{a}_2)$$

通过空间傅立叶展开可以得到各项系数, 依照误差选择所展开的级数项数, 通过独立的基本位移向量可以将单位晶胞来表示, 对于二维周期结构有 $f(\mathbf{r} + \mathbf{a}_1) = f(\mathbf{r} + \mathbf{a}_2) = f(\mathbf{r})$, 其中, \mathbf{a}_1 和 \mathbf{a}_2 为基本位移向量 ($\mathbf{a}_1 \times \mathbf{a}_2 \neq 0$). 在基本位移向量方向具有周期性, 也即在每一个晶胞中将重复同样的行为. 图2为二维光子晶体的空间结构以及对应的基本位移矢量.

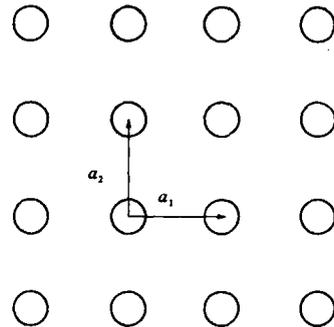


图2 二维光子晶体周期性结构

Fig.2 Two-dimensional photonic crystal structure

结合正交性定理可将 $f(x)$ 表示为:

$$f(\vec{r}) = \sum_c C(\vec{G}) \exp(i\vec{G} \cdot \vec{r})$$

$$\text{式中, } C(\vec{G}) = \frac{1}{A_c} \int_{\text{cell}} f(\vec{r}) \exp(-i\vec{G} \cdot \vec{r}) d^2r;$$

$$A_c = |\vec{a}_1 \times \vec{a}_2|.$$

由于波在周期性环境中的结构会改变电波传播的方向并产生干涉效应, 对于天线所发射电波的 TE/TM 模式会产生不同的影响, 电子在周期性结构中的位能可以用薛定谔方程来表示:

$$-\frac{\hbar}{2m} \nabla^2 \psi(\vec{r}) + f(\vec{r}) \psi(\vec{r}) = E \psi(\vec{r})$$

其中 $\psi(\vec{r})$ 为波的能量本征函数, 而 E 则为波向量 k 的函数记为 E_k , 对应的波能量本征函数为 ψ_k , 对应同一 k 的量子状态为简并模. 当 k 向量被限制在包含单个晶格的第一布里渊区域时, 对应于单个的 k 具有无穷多个离散的 E_k , 也即对应于不同的频率本征值, 从而形成相应的频带结构. 当电波在周期性结构中传播时, 会发生多重散射^[8], 散射后各个方向的分量则叠加形成总的波场, 形成长光/相消区, 当相长区域无法互通时则无法传播波的能量, 构成断裂的传播模态. 另外, 对于二元性光子晶体介质的边界电磁场需要满足边界条件. 带隙内的波向量成为虚数, 在传播方向呈现指数衰减特征.

3 补偿结果分析

发射天线采用 12.45 GHz 的圆极化波,通过光子晶体板垂直入射,补偿板结构为 Al_2O_3 ,折射率为 3.033,孔径的半径大小为 5 mm,晶格常数为 40 mm.图 3 为加入极化滤除板之前与之后的总增益情况分析,在加入光子晶体板后,增益大约减少了一半.并且在波的传播方向,由于收到晶体板的遮挡,产生了多个波束.其中两条曲线分别表示在方位角为 0° 和 90° 时的情况.在垂直孔径的方向上波束的展宽尤为明显.

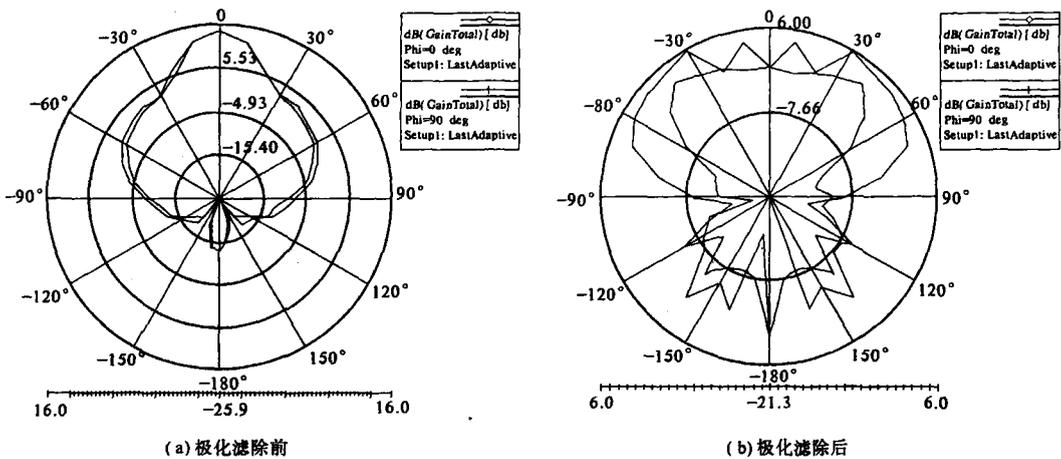


图 3 滤波材料结构对于增益的影响

Fig. 3 Radiation pattern comparisons

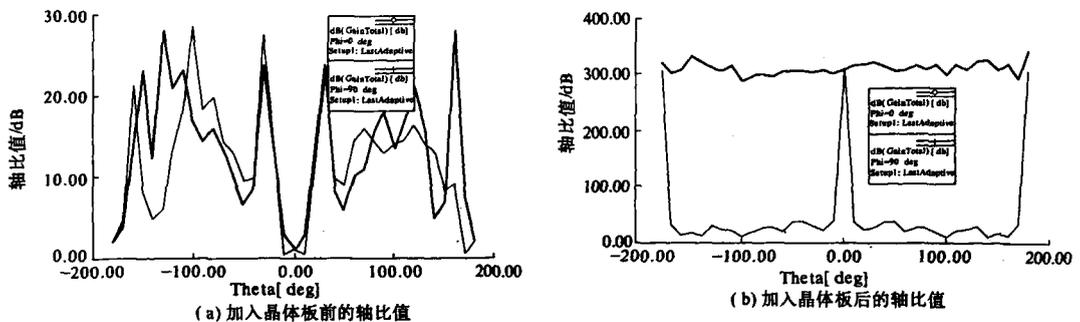


图 4 AR 轴比值分析

Fig. 4 AR performance of the filter

图 5 给出了加入二维光子晶体板后的增益图,通过该图可以更加清楚的表现出经过 Al_2O_3 板的能量分布,可以看出能量的分布相对均匀,但略有分散,同时由于部分极化分量被滤除,能量减小为不到原有增益的一半.

为了能够清楚的表现出所加光子晶体板的极化滤除效果,图 4(a)、(b)分别给出了天线在加入晶体板前和加入晶体板后的轴比值 (AxialRatio, AR),可以看出在加入晶体板后的极化出现了较大的差异,从初始的 30 dB 以内的轴比值上升为 300 dB,在方位角为 0° 也即和孔径平行的方向上的 AR 接近于一条直线,各个角度的差异稳定在很高量级上,而在方位角为 90° 也即和孔径相垂直的方向上的 AR 则在孔径处出现了较大的差异,而在其它方向上保持和原有 AR 近似的程度,产生了极化滤除的效果.

4 结束语

二维光子晶体板由于其制作技术成熟,在通信系统中得到广泛应用.笔者周期性结构的光子晶体板进行傅立叶展开分析,并给出其相应的能带分布,针对二维光子晶体板所形成之带隙进行

相应的设计,实现对天线进行滤波,并通过在高频的圆极化天线所产生的电波进行验证.通过AR轴比值的巨大差异来反应其滤波效果,所不足之处在于对天线的能量分布扩散略大,在未来研究中应当尽力减少能量的缺失.

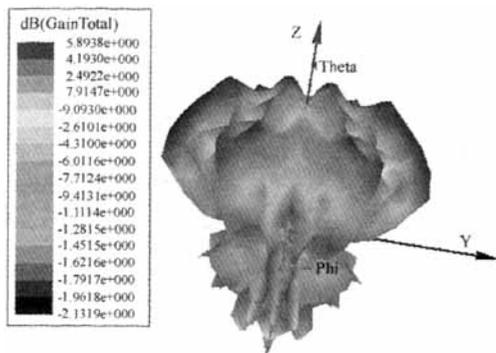


图5 三维远场增益立体图

Fig. 5 3D polar plot of the far field gain

参考文献:

- [1] YU X F, FAN S H. Bends and splitters for self-collimated beams in photonic crystals [J]. Appl. Phys. Lett, 2003, 83 (16): 3251 - 3253.
- [2] 顾培夫, 黄弼勤, 郑臻荣. 用于可见光区的薄膜光子晶体全角度反射器 [J]. 物理学报, 2005, 54 (8): 3707 - 3710.

- [3] LOIKO K Y, HERRERO, R, et al. Efficient parametric amplification of narrow beams in photonic crystals [J]. Optics Letters, 2008, 32 (14): 1992 - 1994.
- [4] SHIH M H, KIM W J, WAN K, et al. Two-dimensional photonic crystal Mach-Zehnder interferometers [J]. Appl. Phys. Lett. 84(4): 2132 - 2134.
- [5] SHARKAWY A, SHI S Y, PRATHER D, et al. Electro-optical switching using coupled photonic crystal waveguides [J]. Optics Express, 2002, 10 (20): 1048 - 1059.
- [6] EDMOND C S Y, LIN S G, JOHNSON P R, et al. Three-dimensional control of light in a two-dimensional photonic crystal slab [J]. Nature, 2000, 983 - 986.
- [7] ROMANATO F, BUSINAROA L, VACCARIA L, et al. Fabrication of 3D metallic photonic crystals by X-ray lithography [J]. Microelectron. Eng, 2003, 67: 479 - 486.
- [8] BIKASH C G, KUO C H, YE Z. Propagation inhibition and localization of electromagnetic waves in two-dimensional random dielectric systems [J]. Phys. Rev, 2004, 69 (6): 1 - 6.

Compensation Material with 2D Photonic Crystal Based Thin films for Antennas

LI Bin¹, LI Gui-ren², ZHOU Xi-zeng³, GU Wan-yi¹

(1. Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 2. Department of Communication Engineering, Oriental Institute of Technology Taipei 22061, China; 3. Department of Communications Engineering, Yuan Ze University, Chung-Li 32003, China)

Abstract: In this paper, we design a Signals from antenna transmitter can be compensated with the two-dimensional photonic crystal based periodical structure. As for the electro magnetic wave, the difference of permittivity or permeability between materials is the same as electron transmission during periodical potential. The e-beam approach can etch the substrate with metal oxide compensation thin films. Utilizing the periodical structure of two-dimensional photonic crystal, we filter the miscellaneous polarization of the incident wave. The electric field can be calculated with boundary conditions, and the energy distribution between TE and TM mode are analyzed. The compensation structure can be produced with sophistic fabrication technology to achieve a higher efficiency of the polarization filter.

Key words: photonic crystal; polarization filter; thin films material