文章编号:1001-5078(2014)06-0659-05

·光子晶体 ·

光子晶体全反射隧穿效应中偏振光的场分布

刘启能

(重庆工商大学计算机科学与信息工程学院,重庆400067)

摘 要:利用特征矩阵的方法,推导出 TM 波和 TE 波在一维光子晶体中电场的分布公式,利用 这些公式研究了一维光子晶体全反射隧穿现象中 TE 波和 TM 波的光场在光子晶体内部的分 布特征。在出现全反射隧穿峰处,TE 波和 TM 波的光场不会随传播深度的增加而衰减。在没 有出现全反射隧穿峰处,TE 波和 TM 波的光场会随深度的增加而迅速衰减为0。这些研究结 果从一维光子晶体内部展现了 TE 波和 TM 波的光场分布特征,深化了对一维光子晶体全反射 隧穿现象形成规律的认识。

关键词:光子晶体;全反射隧穿;偏振光;光场 中图分类号:0436 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2014.05.015

Polarized light field distribution of the total reflection tunnel in photonic crystal

LIU Qi-neng

(Computer Science and Information Engineering College of Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: Using the characteristic matrix method, the light field formula of wave and wave in 1D photonic crystal is derived. The light field distribution of wave and wave in the inner of photonic crystal is studied during the total reflection tunnel in 1D photonic crystal. Light field of wave and wave cannot decrease with the increase of the spread depth in the total reflection tunneling peak. Light field of wave and wave quickly decreases to zero with the increase of the spread depth when there is no the total reflection tunneling peak. These results show the distribution of light field of wave and wave in 1D photonic crystal is demonstrated, and the formation rules of light field distribution of the total reflection tunnel in 1D photonic crystal are further understood.

Key words: photonic crystal; total reflection tunnel; polarized light; light field

1 引 言

光子晶体是其折射率在空间呈周期性变化的人 造带隙材料,利用光子晶体的带隙可以十分方便地 控制光波在光子晶体的传播。因此对光子晶体的研 究很快成为光学的前沿领域内一个活跃的课题。光 子晶体根据其空间周期性的维数不同,分为一维光 子晶体、二维光子晶体和三维光子晶体。由于一维 光子晶体的结构最简单、研究最方便,但它却具有其 他高维光子晶体的基本属性。因此对一维光子晶体 的研究成为光子晶体研究领域内的重要内容。

关于光子晶体的带隙特性[1-3]、缺陷模特

性^[4-6]、滤波特性^[7-9]等方面人们都做了深入的研究。近年来人们对一维光子晶体中的全反射隧穿现象开展了研究,文献[10]对利用特征矩阵法研究了 TE 波在一维光子晶体的全反射隧穿现象,得出了 TE 波的全反射隧穿现象的一些基本特征。随后文 献[11]对 TE 波和 TM 波两种偏振波在一维光子晶 体的全反射隧穿现象开展了深入的研究,得出了 TE

基金项目:重庆市教委科技项目基金资助(No. KJ130713)资助。 作者简介:刘启能(1957 -),男,教授,从事光学与声学研究。

E-mail:liuqineng57@163.com 收稿日期:2013-09-13

波和 TM 波两种偏振波的全反射隧穿现象随入射 角、周期数以及周期厚度的变化规律。随后文献 [12]又对圆柱光子晶体的全反射隧穿滤波特性开 展了研究,发现圆柱光子晶体的全反射隧穿效应具 有良好的梳状滤波特性。为了进一步解释一维光子 晶体全反射隧穿效应的产生原因,文献[13]利用多 光束干涉理论推导出一维光子晶体的全反射隧穿导 带频率满足的解析公式,从理论上解释了一维光子 晶体的全反射隧穿效应产生的物理机理。关于全反 射隧穿现象中光场在一维光子晶体内部的分布问 题,目前还未看到相关的研究介绍。这是一个很有 理论价值的问题,通过对它的研究可以使人们掌握 全反射隧穿现象中光场在一维光子晶体内部的分布 规律,进一步认识一维光子晶体全反射隧穿现象的 内在规律。本文将推导 TM 波和 TE 波两种偏振波 在一维光子晶体内部的光场的分布公式。利用这个 公式研究全反射隧穿现象中两种偏振波在一维光子 晶体内部其光场的分布规律。

2 公式推导

推导 TM 波在一维光子晶体中的光场分布公式,如图 1 所示。







设 TM 波在入射空间磁矢量为 H_0 、电矢量的切向分量为 $E_{0//}$, TM 波通过一维光子晶体中任意一层 Δz_m 后的磁矢量为 H、电矢量的切向分量为 $E_{//0}$ 根据特征矩阵的关系有:

$$\binom{E_{0/\ell}}{H_0} = M_1 M_2 M_3 \cdots M_m \binom{E_{\ell/\ell}}{H} = M \binom{E_{\ell/\ell}}{H}$$
(1)

其中, *M_i* 为 TM 波通过第*i* 层介质中的特征矩阵; *M* 为 TM 波通过前 *m* 层介质中的特征矩阵。由式(1)得:

$$\binom{E_{\prime\prime}}{H} = M^{-1} \binom{E_{0\prime\prime}}{H_0} = \binom{M_{11}^{-1} & M_{12}^{-1}}{M_{21}^{-1} & M_{22}^{-1}} \binom{E_{0\prime\prime}}{H_0}$$
(2)

$$\mathbb{R} \mathbb{H} \mathfrak{I}(2) \mathfrak{A};$$

$$H = M_{21}^{-1} E_{0//} + M_{22}^{-1} H_0$$
(3)

由图1可知:

$$E_{0/2} = E_{0i}\cos\theta_0 - E_{0i}\cos\theta_0 = E_{0i}\cos\theta_0 - rE_{0i}\cos\theta_0$$

= $(1 - r)E_{0i}\cos\theta_0$ (4)

$$H_0 = H_{0i} + H_{0r} = (1+r)H_{oi} = (1+r)\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}n_0E_{0i} \quad (5)$$

式(4)和式(5)式中的 r 是该一维光子晶体对 TM 波的反射系数。

将式(4)和式(5)代入式(3),并利用 H = $\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} nE$,得: $\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} nE = M_{21}^{-1}(1-r)E_{0i}\cos\theta_0$ $+ M_{22}^{-1}(1+r)\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} n_0 E_{0i}$ (6)

由式(6)得出 TM 波在一维光子晶体中任意一 层 Δz_m 后光场的分布公式:

$$|E/E_{0i}| = \left|\frac{1}{n}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} [M_{21}^{-1}(1-r)\cos\theta_0 + M_{22}^{-1}(1+r)n_0\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}]\right|$$
(7)

同理可以推出了对于 TE 波在一维光子晶体中 光场的分布公式为:

$$|E/E_{0i}| = \left| \left[M_{11}^{-1} (1+r) + M_{12}^{-1} (1-r) n_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \cos \theta_0 \right] \right|$$
(8)

式中, r 为该一维光子晶体对 TE 波的反射系数; M 为 TE 波通过前 m 层介质中的特征矩阵。

利用式(7)和式(8)就可以研究一维光子晶体 全反射隧穿效应中两种偏振光场的分布规律。

3 光场分布

设计这种一维光子晶体,如图 2 所示。该一维光 子晶体由氟化镁(其折射率为 $n_1 = 1.38$,厚度为 d_1) 和硫化锌(其折射率为 $n_2 = 2.38$,厚度为 d_2)两种介 质周期性地交替构成。设入射空间和出射空间的介质 也为硫化锌,即 $n_2 = n_0$ 。由于该光子晶体的两边都为 硫化锌,因此它的周期数为 N + 0.5, N 为整数。又因 $n_0 > n_1$,所以当光大于全反射角入射该光子晶体时会 产生全反射现象,其全反射角为 $\theta_m = \arcsin(n_1/n_0) =$ 0.62 rad。取 N = 5、 $n_1d_1 = n_2d_2 = \lambda_0/4$, $\lambda_0 = 600$ nm, 对应的圆频率 $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$, c 为真空中光速。



利用特征矩阵法计算当圆频率 $\omega = 2\omega_0$ 时的 TE 波和 TM 波入射该一维光子晶体,其透射率随入 射角的响应曲线,如图 3 和图 4 所示。

由图 3 可以看出:当 TE 波小于全反射角入射 时,在 $\theta_0 = 0 - 0.55$ rad 范围其透射率较大,在 $\theta_0 = 0.55 \sim 0.62$ rad 范围其透射率为0,这是光子晶体 禁带。当 TE 波大于全反射角(0.62 rad)入射时, 在入射角 $\theta_0 = 0.98 \sim 1.02$ rad 范围内出现了多个 密集的透射峰,即出现了全反射隧穿现象。大于全 反射角的其他角度其透射率仍为0。

由图4可以看出:当TM 波小于全反射角入射时,在 $\theta_0 = 0 \sim 0.62$ rad 范围其透射率较大,当TM 波大于全反射角入射时,在入射角 $\theta_0 = 0.76 \sim 0.84$ rad 范围内出现了多个密集的透射峰,即出现了全反射隧穿现象。大于全反射角的其他角度其透射率仍为0。





对于发生全反射隧穿现象时一维光子晶体内 部两种偏振光的场分布特征,下面研究两种情况, 一是出现全反射隧穿峰处两种偏振光在一维光子 晶体内部光的场分布,二是没有出现全反射隧穿 峰处两种偏振光在一维光子晶体内部光的场 分布。 3.1 隧穿峰处的场分布

由图 3 知道,当圆频率 $\omega = 2\omega_0$ 时,TE 波在入 射角 $\theta_0 = 0.98 - 1.02$ rad 范围内出现全反射隧穿 峰。固定 $\omega = 2\omega_0 和 \theta_0 = 1$ rad,由式(8)计算出 TE 波的光场随周期数的分布曲线,如图 5 所示。由图 5 可以看出一维光子晶体内部 TE 波的光场分布有 以下特征:

① 随着 TE 波在一维光子晶体内部的传播深度 的增加其光场分布近似呈周期性的变化。三个较大 的极大值分别出现在 0.8 周期、2.8 周期、4.8 周期 处,三个较小的极小值分别出现在 0.2 周期、2.2 周 期、4.2 周期处。

②光场分布随 TE 波在一维光子晶体内部的传播深度的增加略有增加。第一个较大的极大值为 3.2,第二个较大的极大值为 3.5,第三个较大的极 大值为 3.6。这就保证了 TE 波能够顺利穿过该一 维光子晶体而出现全反射隧穿现象。

③TE 波在一维光子晶体内部的每个分界面处 (即周期数为0.5,1,1.5,2,2.5,3,3.5,4,4.5,5 处) 光场都是连续分布的。这是因为电场在界面两侧切 向分量连续,而 TE 波只有切向分量,所以在每个分 界面处电场都是连续分布的。

由图 4 知道, TM 波在入射角 $\theta_0 = 0.76 ~$ 0.84 rad 范围内出现全反射隧穿峰。固定 $\omega = 2\omega_0$ 和 $\theta_0 = 0.8$ rad,由式(7)计算出 TM 波光场随周期 数的分布曲线,如图 6 所示。由图 6 可以看出该一 维光子晶体内部 TM 波的光场分布有以下特征:

① 随着 TM 波在一维光子晶体内部的传播深度的增加其光场没有衰减,但光场分布的周期性不明显,要比 TE 波的光场分布更为复杂,规律性不明显。光场较大的三个极大值分别出现在 1.8 周期、3.7 周期、4.8 周期处,三个较小的极小值分别出现在 1.2 周期、2.4 周期、4.2 周期处。

②光场较大的三个极大值随 TM 波在一维光子 晶体内部的传播深度的增加呈现起伏变化。第一个 极大值为 3.2,第二个极大值为 2.6,第三个极大值 为 3.0。这就保证了 TM 波能够顺利穿过该一维光 子晶体而出现全反射隧穿现象。

③TM 波在一维光子晶体内部的每个分界面处 (即周期数为0.5,1,1.5,2,2.5,3,3.5,4,4.5,5 处) 光场都是不连续的。这是因为当 TM 波斜入射一维 光子晶体时,TM 波的电场不仅有切向分量而且还 有法向分量。电场切向分量满足了在界面两侧连 续,则会使电场在界面两侧不连续。









由图 3 知道,当圆频率 $\omega = 2\omega_0$ 时 TE 波在入射角 $\theta_0 = 0.8$ rad 处没有出现全反射隧穿峰。固定 $\omega = 2\omega_0$ 和 $\theta_0 = 0.8$ rad ,由式(8)计算出 TE 波的光场随周期 数的分布曲线,如图 7 所示。由图 7 可以看出 TE 波在 一维光子晶体内部其光场分布具有以下特征:

①刚进入一维光子晶体处 TE 波的光场为最大,其值为1.75。随着传播深度的增加 TE 波的光场也周期性地出现了2个峰,但2个峰的峰值随传播深度的增加迅速衰减。第一个峰出现在0.8 周期处其光场为0.25,第二个峰出现在1.8 周期处其光场为0.05。当传播深度大于2.3 周期后其光场已经降低为0。因此当 TE 波以入射角 θ₀ = 0.8 rad 入射该一维光子晶体时不会出现全反射隧穿现象。

②TE 波在一维光子晶体内的每个分界面处 (即周期数为0.5,1,1.5,2,2.5,3,3.5,4,4.5,5 处) 电场也都是连续分布的。

由图 4 知道,当圆频率 $\omega = 2\omega_0$ 时 TM 波在入射 角 $\theta_0 = 0.7$ rad 处没有出现全反射隧穿峰。固定 $\omega = 2\omega_0 和 \theta_0 = 0.7$ rad,由式(7)计算出 TM 波的 光场随周期数的分布曲线,如图 8 所示。由图 8 可 以看出 TM 波在一维光子晶体内部其电场分布具有 以下特征: ①刚进入一维光子晶体处 TM 波的光场为最大,其值为2.4。随着传播深度的增加 TM 波的光场 也周期性地出现了3个峰,但3峰的峰值随传播深 度的增加迅速衰减。第一个峰出现在0.8 周期处其 光场为0.6,第二个峰出现在1.8 周期处其光场为 0.25,第三个峰出现在2.8 周期处其光场为0.15。 当传播深度大于3.3 周期后其光场已经降低为0。 因此当 TM 波以入射角 θ₀ = 0.7 rad 入射该一维光 子晶体时不也会出现全反射隊穿现象。

②TM 波在一维光子晶体内部的每个分界面处 (即周期数为 0.5,1,1.5,2,2.5,3 处)其电场也是 不连续的。







4 结 论

利用特征矩阵法推导出 TM 波和 TE 波在一维 光子晶体中光场的分布公式。利用这个公式研究了 一维光子晶体全反射隧穿现象中 TE 波和 TM 波的 光场在光子晶体内部的分布特征。在出现全反射隧 穿峰处,一维光子晶体内部 TE 波和 TM 波的光场不 会随传播深度的增加而衰减。在没有出现全反射隧 穿峰处,一维光子晶体内 TE 波和 TM 波的光场会随 深度的增加而迅速衰减为0。这些研究结果从一维 光子晶体内部展现了 TE 波和 TM 波的光场分布特 征,深化了对一维光子晶体全反射隧穿现象形成规 律的认识。

参考文献:

- [1] WANG Rui, ZHANG Cunxi, NIE Yihang. Band structure and propagation properties of one-dimension anisotropy photonic crystalsl [J]. Acta Photnica Sinica, 2007, 35 (1):89-92. (in Chinese)
 王瑞,张存喜, 聂一行. 一维各向异性光子晶体的带隙 结构和传输特性[J]. 光子学报,2007,35(1):89-92.
- [2] LI Rong, REN Kun, REN Xiaobin. Angular and wavelength selectivity of band gaps of holographic photonic crystals for different polarizations [J]. Acta Phys. Sin. 2004,53(8):2520-2523. (in Chinese) 李蓉,任坤,任晓斌. 一维光子晶体带隙结构对不同偏振态的角度和波长响应[J].物理学报,2004,53(8):2520-2523.
- [3] LIU Qineng. A new simple and convenient method for study of properties forbidden band of one-dimensional photonic crystal[J]. Acta Photnica Sinica, 2007, 36(6): 1031 – 1034. (in Chinese)

刘启能. 一种简便的研究一维光子晶体禁带特征的新 方法[J]. 光子学报,2007,36(6):1031-1034.

- [4] LIU Qineng. Defect modes of Ag-doped photonic crystal
 [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(5):702 706. (in Chinese)
 刘启能. 金属掺杂一维光子晶体的缺陷模特性[J]. 半导体光电, 2009, 30(5):702 70.
- [5] LIU Qineng. The mode and defect mode of electromagnetic wave in rectangular doped photonic crystal [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(4):2551-2555. (in Chinese) 刘启能. 矩形掺杂光子晶体中电磁波的模式和缺陷模 [J]. 物理学报, 2010, 59(4):2551-2555.
- [6] LIU Qineng. The defect mode and the quantum effect of light wave in cylindrical anisotropic photonic crystal [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60 (1):0142171 0142174. (in Chinese)

刘启能.各向异性圆柱掺杂光子晶体的缺陷模及其量 子效应[J].物理学报,2011,60(1):0142171-0142174.

[7] XÜ Jingping, WANG Ligang, YANG Yaping. Realization of an angular filter using one-dimensional photonic crystal containing negative refractive metamaterials [J]. Acta Physica Sinica,2006,55(6):2765-2768.(in Chinese) 许静平,王立刚,羊亚平.利用含负折射率材料的光子 晶体实现角度滤波器[J].物理学报,2006,55(6): 2765-2768.

- [8] XÜ Xuming, FANG Liguang, LIU Nianhua. Unusual photonic tunneling in multilayer system with a negative refraction Index layer[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(12): 1676 1679. (in Chinese)
 徐旭明,方利广,刘念华. 含负折射率层的多层体系的反常光子隧穿[J]. 光学 提, 2005, 25(12): 1676 1679.
- [9] SHANG Tingyi, ZHENG Yi, ZHANG Huiyun. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals with negative-index materials[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(4)663 666. (in Chinese)
 尚廷义,郑义,张会云. 含负折射率材料一维光子晶体的全方位带隙和缺陷模[J]. 光子学报, 2007, 36(4): 663 666.
- [10] FANGYuntuan, LIANG Zhongcheng. Unusual transmission through usual one-dimensional photonic crystal in the presence of evanescent wave [J]. Opt Commun, 2010, 283:2102-2106.
- [11] LIU Qineng. Total reflection through effect of light in 1 D photonic crystal [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40 (2):231-235. (in Chinese)
 刘启能. 光在一维光子晶体中的全反射贯穿效应[J]. 光子学报,2011,40(2):231-235.
- [12] LIU Qineng. Comb filtering properties of total reflection tunnelling in cylindrical photonic crystals [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2012, 29(1):133 – 137. (in Chinese) 刘启能. 圆柱光子晶体全反射隧穿梳状滤波特性[J]. 计算物理,2012,29(1):133 – 137.
- [13] LIU Qineng. Analytical study on total reflection tunnel effect of 1 D photonic crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2012,32(2):193 196. (in Chinese) 刘启能. 一维光子晶体的全反射隧穿效应的解析研究[J]. 光学学报,2012,32(2):193 196.