

文章编号:1004-4213(2011)02-0232-5

光在一维光子晶体中的全反射贯穿效应

刘启能

(重庆工商大学 废油资源优技术与装备教育部工程研究中心,重庆 400067)

摘 要:为了研究一维光子晶体中光波的全反射贯穿效应,利用传输矩阵法计算了 TE 波和 TM 波在大于全反射角入射一维光子晶体的透射率.在透射波中发现了全反射贯穿效应,得出了全反射贯穿效应随入射角的变化规律、全反射贯穿效应的波长特性以及全反射贯穿效应随介质光学厚度的变化规律.利用波的量子理论和渐逝波的理论对一维光子晶体的全反射贯穿效应作出了理论解释.

关键词:光子晶体;全反射;贯穿效应;光波

中图分类号:O436

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114002.0232

0 引言

光子晶体的概念是由 S. John 和 E. Yablonovitch 在 1987 年分别提出来的.所谓光子晶体就是其折射率呈周期性变化的人造带隙材料.光在光子晶体中传播时会与光子晶体的周期结构发生相互作用,从而产生带隙.利用光子晶体的带隙可以十分方便地控制光波的传播,因此光子晶体在现代科学技术上有着十分广泛的应用前景.这使得对光子晶体的研究成为目前光学的前沿领域内一个活跃的问题.

目前对一维光子晶体的研究中,在研究方法、带隙特性、缺陷模特性以及滤波理论等方面都取得了丰硕的成果^[1-11].文献[12]研究了光波在大于全反射角入射一维光子晶体时出现的渐逝波现象,得到了一维光子晶体中渐逝波随入射角的变化特征和渐逝波随周期数的变化特征,但文献[12]没有涉及 TM 波的情况.因此,对于光波在大于全反射角入射一维光子晶体时出现的这一新现象有待做进一步的研究.本文将利用传输矩阵法对这一现象进行深入地研究,并从理论上对光波在大于全反射角入射一维光子晶体时出现的全反射贯穿效应进行理论解释.

1 模型与理论

一维光子晶体是由氟化镁(其折射率为 $n_1 = 1.38$ 、厚度为 d_1)和碲化铅(其折射率为 $n_2 = 4.1$ 、厚度为 d_2)两种介质周期性地交替构成,如图 1.设入射空间和出射空间的介质也为碲化铅,即 $n_2 = n_0$.由

于该光子晶体的两边都为碲化铅,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应该产生全反射现象.

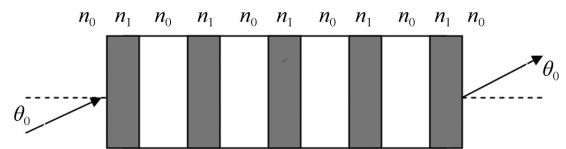


图 1 一维光子晶体

Fig. 1 1D photonic crystal

为了研究光在大于全反射角入射该一维光子晶体时出现的全反射贯穿效应,利用文献[13]中推出的分层介质中光波的传输矩阵,则一个周期的传输矩阵 m 为

$$m = m_{21} m_1 m_{12} m_2 \tag{1}$$

式中

$$m_1 = \begin{bmatrix} e^{-ik_1 d_1 \cos \theta_1} & 0 \\ 0 & e^{ik_1 d_1 \cos \theta_1} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$m_2 = \begin{bmatrix} e^{-ik_2 d_2 \cos \theta_2} & 0 \\ 0 & e^{ik_2 d_2 \cos \theta_2} \end{bmatrix}$$

对 TE 波有

$$m_{ij} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \frac{n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i} & 1 - \frac{n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i} \\ 1 - \frac{n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i} & 1 + \frac{n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i} \end{pmatrix} \tag{3}$$

对 TM 波有

$$m_{ij} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \frac{n_j}{n_i} + \frac{\cos \theta_j}{\cos \theta_i} & \frac{n_j}{n_i} - \frac{\cos \theta_j}{\cos \theta_i} \\ \frac{n_j}{n_i} - \frac{\cos \theta_j}{\cos \theta_i} & \frac{n_j}{n_i} + \frac{\cos \theta_j}{\cos \theta_i} \end{pmatrix} \tag{4}$$

基金项目:重庆市教委科技项目基金(No. KJ100717)资助

第一作者:刘启能(1957-),男,教授,主要研究方向为原子、分子和光学物理. Email:liuqineng@yahoo.com.cn

收稿日期:2010-09-27;修回日期:2010-11-09

式(2)~(4)中 θ 为传播角, n 为折射率, $k=2\pi/\lambda$ 为波矢. 整个光子晶体的传输矩阵 M 为

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = m^N (m_{21} m_1 m_{12}) \quad (5)$$

光通过该光子晶体的反射系数 r 分别为

$$r = M_{21} / M_{11} \quad (6)$$

不计材料的吸收时, 光通过该光子晶体的透射率 T 为

$$T = 1 - r^2 \quad (7)$$

利用式(1)~(7)可以研究光在大于全反射角入射该一维光子晶体时出现的全反射贯穿效应. 本文的计算中取 $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0 / 4$, 中心波长 $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$, $N=5$, 令归一化波长 $\Delta = \lambda / \lambda_0$ (λ 为真空中光波的波长).

2 全反射贯穿效应

由光的折射定律可知, 当光从折射率(n_0)大的介质入射到折射率(n_1)小的介质的分界面时会发生全反射现象, 其全反射角为 $\theta_m = \arcsin(n_1/n_0) = 0.34 \text{ rad}$. 计算出 TE 波和 TM 波从碲化铅中射入到氟化镁单一界面上其透射率随入射角的响应曲线, 如图 2.

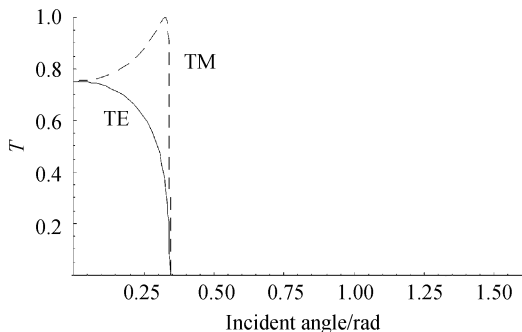


图 2 单一界面上透射率随入射角的响应曲线
Fig. 2 Response curves of transmissivity of interface versus incident angle

由图 2 可以清楚地看出:

1) 当 TE 波小于全反射角入射时透射率随入射角的增加而减小, 当入射角接近全反射角时透射率迅速降低为 0. 当入射角大于全反射角时透射率恒为 0, TE 波不能进入氟化镁内.

2) 当 TM 波小于全反射角入射时透射率随入射角的增加而增大, 当入射角接近全反射角时透射率迅速降低为 0. 当入射角大于全反射角时透射率恒为 0, TM 波也不能进入氟化镁内.

研究结果表明对于单一界面, 当 TE 波和 TM 波大于全反射角入射时都不能产生全反射贯穿效应, 并且这一特征与入射波的波长无关.

再来研究光大于全反射角入射一维光子晶体的情况, 计算出 TE 波和 TM 波入射该光子晶体时其透射率随入射角的响应曲线, 如图 3.

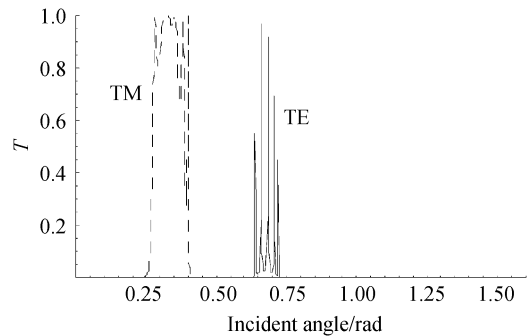


图 3 光子晶体的透射率随入射角的响应曲线
Fig. 3 Response curves of transmissivity of photonic crystal versus incident angle

由图 3 可以清楚地看出它与图 2 有明显的不同:

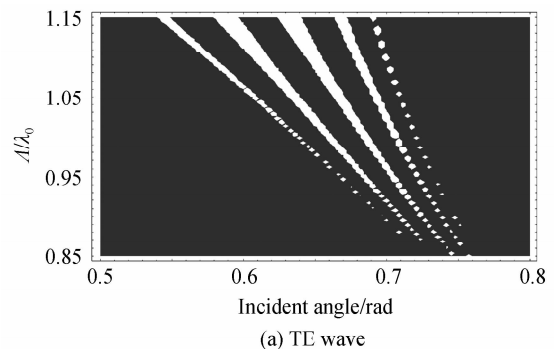
1) 当 TE 波小于全反射角入射时透射率都为 0, 即在 $\theta_0 = 0 - 0.34 \text{ rad}$ 范围内出现了禁带, 这是光子晶体的基本特性. 当 TE 波大于全反射角入射时出现了新的现象, 在入射角 $\theta_0 = 0.6 - 0.75 \text{ rad}$ 间出现了五个明显的透射峰, 称它们为全反射贯穿效应.

2) 当 TM 波小于全反射角入射时, 在 $\theta_0 = 0 - 0.25 \text{ rad}$ 范围内透射率为 0 是禁带, 在 $\theta_0 = 0.25 - 0.34 \text{ rad}$ 范围内透射率为 1 是导带. 当 TM 波大于全反射角入射时也出现了新的现象, 在入射角 $\theta_0 = 0.34 - 0.42 \text{ rad}$ 间出现了透射率为 1 的透射峰带. 这表明 TM 波大于全反射角入射光子晶体时也会产生全反射贯穿效应.

为了研究全反射贯穿效应的规律, 下面分别从三个方面研究, 即全反射贯穿效应随入射角变化的特性、全反射贯穿效应的波长特性、全反射贯穿效应随介质光学厚度变化的特性.

2.1 贯穿效应随入射角的变化

固定 $N=5$, 计算出 TE 波和 TM 波的全反射贯穿峰的波长随入射角的响应曲线, 分别如图 4(a) 和 (b).



(a) TE wave

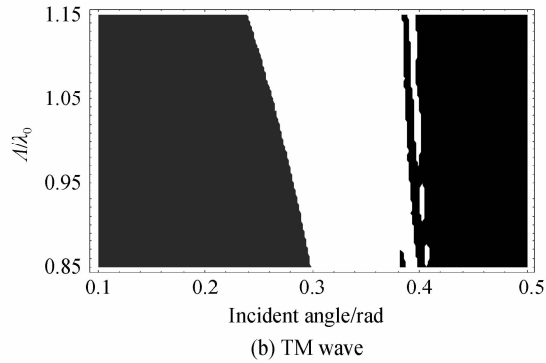


图4 贯穿峰的波长随入射角的响应曲线

Fig. 4 Response curves of wavelength versus incident angle

在图4中 x 轴表示入射角, y 轴表示入射波的归一化波长,白色为透射峰带,黑色为透射率为0的区域.由图4可以看出:

1)TE波在入射角大于全反射角 $\theta_m = 0.34$ rad的区域内出现了5条明显的透射峰带,即全反射贯穿效应.5条透射峰带的波长都随入射角的增加而减小.5条透射峰带对应的入射角宽度都随入射角的增加而减小.相邻两条透射峰的角间距随入射角的增加而减小.

2)TM波与TE波有明显的区别,TM波的全反射贯穿透射峰主要部分(称它为主带)与小于全反射角的导带连在一起.但大于全反射角 $\theta_m = 0.34$ rad的区域内有一条全反射贯穿透射峰细带与主带是分离的,细带的位置在 $\theta_0 = 0.41$ rad附近,细带的波长都随入射角的增加而迅速减小.下面研究TM波的全反射贯穿效应主要研究这条细带的特征.

2.2 贯穿效应的波长特性

为了研究全反射贯穿效应的波长特性,对TE波固定入射角 $\theta_0 = 0.7$ rad,对TM波固定入射角 $\theta_0 = 0.41$ rad,计算出TE波和TM波的透射率随波长的响应曲线,分别如图5(a)和(b).由图5可以看出:

1)当TE波以入射角 $\theta_0 = 0.7$ rad入射时,在透射空间出现了波长为 $\lambda = 0.89\lambda_0$, $\lambda = 0.92\lambda_0$, $\lambda = 0.96\lambda_0$, $\lambda = 1.02\lambda_0$, $\lambda = 1.10\lambda_0$ 的5个全反射贯穿峰.相邻两峰的波长间距随波长的增加而增大.各峰的半高宽不相等,波长最小的峰其半高宽最小.

2)当TM波以入射角 $\theta_0 = 0.41$ rad入射时,在透射空间也出现了波长为 $\lambda = 0.59\lambda_0$, $\lambda = 0.61\lambda_0$, $\lambda = 0.66\lambda_0$, $\lambda = 0.73\lambda_0$, $\lambda = 0.83\lambda_0$ 的5个全反射贯穿峰.相邻两峰的波长间距也随波长的增加而增大.各峰的半高宽也不相等,波长最小的峰其半高宽也最小.TM波的全反射贯穿峰的半高宽明显比TE波的大.

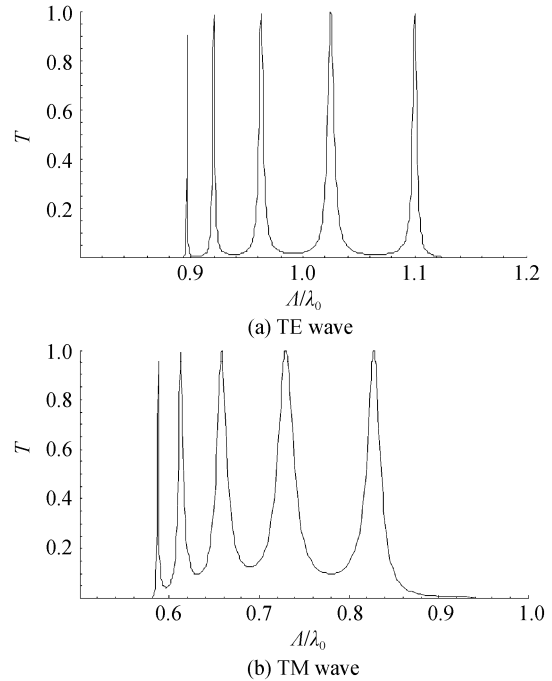


图5 透射率随波长的响应曲线

Fig. 5 Response curves of transmissivity versus wavelength

2.3 贯穿效应随介质光学厚度的变化

两层介质的光学厚度是指 n_1d_1 和 n_2d_2 ,为了研究方便令 $n_1d_1 = n_2d_2 = X\lambda_0$, X 为无量纲的参变量,两层介质的光学厚度正比于 X .因此可以用 X 来描述两层介质的光学厚度,这里就通过 X 的变化来描述介质光学厚度的变化.对TE波仍固定入射角 $\theta_0 = 0.7$ rad,对TM波仍固定入射角 $\theta_0 = 0.41$ rad,计算出TE波和TM波的全反射贯穿峰的波长随介质光学厚度的响应曲线,分别如图6(a)和(b).图6

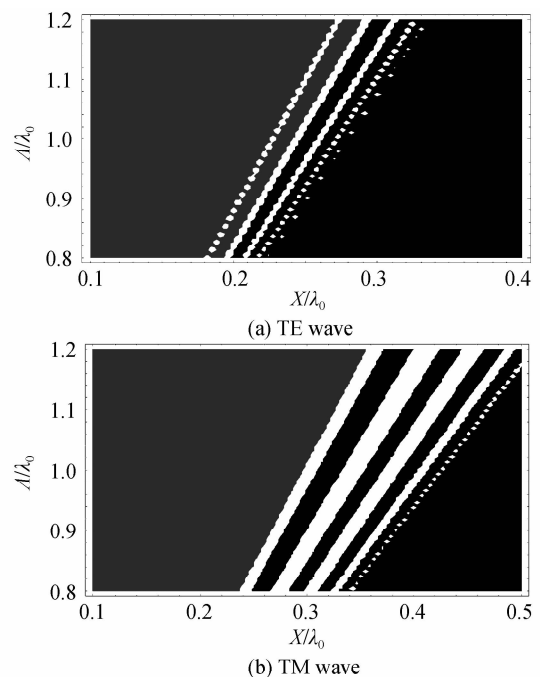


图6 波长随光学厚度的响应曲线

Fig. 6 Response curves of wavelength versus thickness

中白色带为全反射贯穿峰,可以看出:

1)当 TE 波以入射角 $\theta_0 = 0.7 \text{ rad}$ 入射时,5 个全反射贯穿峰的波长都随介质光学厚度的增加成线性增加.各峰的半高宽随介质光学厚度的增加而无明显变化.

2)当 TM 波以入射角 $\theta_0 = 0.41 \text{ rad}$ 入射时,5 个全反射贯穿峰的波长也随介质光学厚度的增加成线性增加.各峰的半高宽随介质光学厚度的增加而有所增加.

该一维光子晶体可以看成 N 个由两边为氟化镁中间夹一层碲化铅的单元构成,如果入射角大于全反射角的光波进入该单元内,光波就会在碲化铅层中间往复地全反射,从而产生共振现象.因此每个这样的单元对于大于全反射角传播的光波就是一个谐振腔,光波在谐振腔内发生共振时,由量子理论可知光波就会在腔壁产生隧道贯穿效应,从而出现贯穿效应.当光波在谐振腔发生共振时,其波长 λ 满足

$$2nd\cos\theta + \lambda/2 = m\lambda \quad m=1,2,3\cdots \quad (8)$$

式(8)中 nd 谐振腔的光学厚度, θ 为光的传播角.由式(8)可以知:当 m 和 θ 一定时,共振波长正比于谐振腔的光学厚度,这和图 6 的计算结果吻合.

入射角大于全反射角的光波并不是完全不能进入氟化镁中,光波是以渐逝波的形式进入氟化镁层,计算出 TE 波在大于全反射角进入氟化镁层时其透射率随氟化镁层的光学厚度的响应曲线,如图 7.由图 7 可以看出,渐逝波可以进入氟化镁中近一个波长的深度,而光子晶体中氟化镁层只有四分之一波长的厚度,因此渐逝波穿过氟化镁层后进入碲化铅层,并且在碲化铅层中引起光波的共振现象,由此产生了光子晶体中光波的全反射贯穿效应.

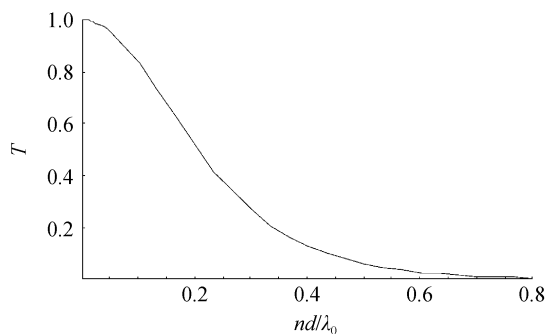


图 7 透射率随光学厚度的响应曲线(TE 波)

Fig. 7 Response curves of transmissivity versus thickness(TE wave)

3 结论

本文利用传输矩阵法研究了光波在大于全反射角入射一维光子晶体时所产生的全反射贯穿效应,得出了全反射贯穿效应随入射角的变化规律、全反

射贯穿效应的波长特性以及全反射贯穿效应随介质光学厚度的变化规律.利用波的量子理论和渐逝波的理论对一维光子晶体的全反射贯穿效应作出了理论解释.

参考文献

- [1] FANG Yun-tuan, SHEN Ting-gen, TAN Xi-lin. Study on one dimensional photonic crystal with impurity defect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1557-1560.
方云团,沈廷根,谭锡林.一维光子晶体掺杂缺陷模研究[J].*光学学报*, 2004, **24**(11): 1557-1560.
- [2] ZHOU Jin-gou, DU Gui-qiang, ZHANG Ya-wen, et al. Electromagnetic modes of thickness modulated dual periodic one dimensional photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(8): 3703-3707.
周金苟,杜桂强,张亚文.双周期厚度调制的一维光子晶体的电磁模[J].*物理学报*, 2005, **54**(8): 3703-3707.
- [3] ZHANG Deng-guo, NI Na, AN He-nan. Electromagnetic field analysis and numerical calculation of one-dimensional magneto-photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 1007-1010.
张登国,倪娜,安鹤南.一维磁性光子晶体的电磁场分析和数值计算[J].*光子学报*, 2004, **33**(8): 1007-1010.
- [4] WANG Rui, ZHANG Cunxi, NIE Yihang. Band structure and propagation properties of one-dimension anisotropy photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **35**(1): 89-92.
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, **36**(1): 89-92.
- [5] LIU Qi-neng. Properties of polarization of defect mode of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8): 1432-1435.
刘启能.一维光子晶体缺陷模偏振特性的研究[J].*光子学报*, 2007, **36**(8): 1432-1435.
- [6] LIU Qi-neng. Theoretical study of multi-channel polarization tunable filter of photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 305-308.
刘启能.光子晶体多通道可调谐偏振滤波器的理论研究[J].*光子学报*, 2008, **37**(2): 305-308.
- [7] LIU Qi-neng. Transmission characteristics of electromagnetic wave in 1D rectangle photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 847-850.
刘启能.一维矩形光子晶体中电磁波的传输特性[J].*光子学报*, 2010, **39**(5): 847-850.
- [8] LIU Qi-neng. Filtering feature of 1D rectangle doping photonic crystal [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(8): 2041-2044.
刘启能.一维矩形掺杂光子晶体的滤波特性[J].*中国激光*, 2010, **37**(8): 2041-2044.
- [9] LIU Qi-neng. A new simple and convenient method for study of properties forbidden band of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1031-1034.
刘启能.一种简便的研究一维光子晶体禁带特征的方法[J].*光子学报*, 2007, **36**(6): 1031-1034.
- [10] LIU Qi-neng. Defect mode and mode of electromagnetic wave in cylindrical doping photonic crystal [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(4): 991-994.
刘启能.圆柱形掺杂光子晶体中电磁波的模式和缺陷模[J].*中国激光*, 2010, **37**(4): 991-994.
- [11] LIU Qi-neng. The mode and defect mode of electromagnetic wave in rectangular doped photonic crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(4): 2551-2555.

- 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.
- [12] FANG Yun-tuan, LIANG Zhong-cheng. Unusual transmission through usual one-dimensional photonic crystal in the presence of evanescent wave [J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(10): 2102-2106..
- [13] LIU Qi-neng. A new method that study electromagnetic waves transfer in stratified medium [J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(3): 14-15.
- 刘启能. 一种研究电磁波在分层介质中传输的新方法[J]. 激光杂志, 2009, **30**(3): 14-15.

Total Reflection Through Effect of Light in 1D Photonic Crystal

LIU Qi-neng

(*Engineering Research Centre for Waste Oil Recovery Technology and Equipment (Ministry of Education),
College of Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China*)

Abstract: The transition matrix method was adopted, and the transmissivity of TE wave and TM wave were analyzed when incident angle greater than full reflection angle, to study the total reflection through effect of light in one-dimensional (1D) photonic crystal. The total reflection through effect was found in the transmission wave. Response curves of the through effect versus incident angle, response curves of the through effect versus wavelength, and response curves of the through effect versus medium thickness were obtained. Total reflection through effect of light in 1D photonic crystal was also explained by the theories of quantum and evanescent wave.

Key words: Photonic crystal; Total reflection; Through effect; Light