

## 空气环型二维光子晶体完全带隙特性研究\*

刘会<sup>1)3)</sup> 刘丹<sup>2)</sup> 赵恒<sup>1)</sup> 高义华<sup>2)3)†</sup>

1) (华中科技大学光学与电子信息学院, 武汉 430074)

2) (华中科技大学物理学院, 武汉 430074)

3) (华中科技大学, 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

(2013年4月23日收到; 2013年5月21日收到修改稿)

采用平面波展开法, 系统研究了空气环型二维光子晶体的完全光子带隙随结构参数变化而改变的规律, 并将其与普通的空气孔型和介质柱型二维光子晶体的完全带隙进行了比较. 研究表明: 空气环型二维光子晶体不仅可以获得更宽的完全带隙, 而且, 当介质折射率较低时, 其可以获得普通空气孔型和介质柱型二维光子晶体在低折射率条件下所无法获得的完全带隙.

**关键词:** 空气环型二维光子晶体, 完全带隙, 平面波展开法

**PACS:** 42.70.Qs, 78.20.Bh

**DOI:** 10.7498/aps.62.194208

## 1 引言

光子晶体是介电常数在空间呈周期性变化的电介质微结构, 其变化周期与光波长的量级相同. 类似于电子在半导体中受原子周期性势场的作用而存在带隙(禁带)一样, 光子晶体中也存在着带隙结构<sup>[1]</sup>.

光子晶体的出现展示了许多重要的应用, 如高性能的波长滤波器<sup>[2,3]</sup>, 将光控制到光子晶体的线缺陷中形成光波导<sup>[4,5]</sup>, 将光控制到光子晶体的点缺陷中形成光学微腔<sup>[6,7]</sup>等, 这些应用都是基于光子晶体的带隙特性. 一般而言, 光子带隙越宽, 光子晶体器件性能越稳定. 因此, 理论上研究光子晶体的带隙特性, 设计出具有更宽完全带隙的光子晶体对光子晶体器件的设计具有重要意义<sup>[8]</sup>.

光子晶体可分为一维、二维和三维光子晶体. 理论上, 三维光子晶体在空间的各个方向都可存在光子带隙, 因而可以完美地控制光, 然而, 在实际研究三维光子晶体时, 在数值理论研究与器件工艺制造两方面都存在着严重的限制. 相对而言, 二维光子晶体即存在广泛的应用, 又相对容易制造<sup>[9]</sup>.

对于二维光子晶体, 在周期平面内传播的光可划分为两个偏振态, 分别为横电模 (TE) 与横磁模 (TM). 对于常用的空气孔型和介质柱型二维光子晶体, 当构成光子晶体的两种介质的介电常数之差不是足够大的话, 很难获得对 TE 偏振态和 TM 偏振态同时具有光子带隙的完全带隙.

同时, 如何通过使用较为简单的结构获得更宽的完全带隙也面临很多的困难. 研究表明, 通过降低光子晶体结构对称性可以获得更宽的完全带隙. 为降低光子晶体结构对称性, 可以采用多种方法, 比如使用各向异性介质材料代替各向同性材料<sup>[10,11]</sup>、改变散射子的形状以及晶格结构<sup>[12,13]</sup>、采用复合式结构<sup>[14]</sup>等. 然而以上的方法在实际实现上都面临着一定的困难. 比如采用复合式结构提高完全带隙带宽会使光子晶体结构复杂化, 不适合工艺制造.

为了通过使用简单且常用的结构来实现更宽完全带隙的获得, Kurt 等人提出了空气环型二维光子晶体结构<sup>[15]</sup>. 空气环型二维光子晶体可以看作是在空气背景中呈周期性排列的介质柱与在介质背景中呈周期性排列的空气孔的组合, 其中介质柱位于空气孔的正中央. Kurt 等人研究了由半导体

\* 国家自然科学基金(批准号: 11074082)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: gaoyihua@hust.edu.cn

材料 GaAs ( $\epsilon = 13$ ) 和空气为介质组成的空气环型二维光子晶体的完全带隙随空气环内径和外径的变化情况. 研究表明, 对于正方晶格光子晶体而言, 相对于空气孔型二维光子晶体, 空气环型二维光子晶体可以获得更宽的完全带隙. 因而, 空气环结构可以被用来实现更宽的完全带隙的获得. 然而, 在 Kurt 等人的文章中, 作者仅研究了由 GaAs 和空气为介质组成的空气环型光子晶体的完全带隙特性, 到目前为止, 也没有文献系统的研究空气环型光子晶体的完全带隙随结构参数 (包括: 介质折射率、空气环归一化内径、空气环归一化外径、晶格结构) 变化而变化的规律.

因而, 本文通过采用平面波展开法计算光子晶体带结构, 系统地研究了空气环型二维光子晶体完全带隙随结构参数变化而改变的情况, 并将其与普通的空气孔型与介质柱型二维光子晶体完全带隙特性进行了比较. 研究表明, 空气环型二维光子晶体不仅可以获得更宽的完全带隙, 而且, 当介质折射率较低时, 其可以获得普通空气孔型和介质柱型二维光子晶体在低折射率条件下所无法获得的完全带隙.

## 2 计算结果与分析

### 2.1 空气孔型二维光子晶体

首先我们研究三角晶格与正方晶格空气孔型二维光子晶体的完全带隙特性.

空气孔型二维光子晶体结构参数为: 空气折射率取为 1, 背景介质折射率为  $n$ , 空气孔半径为  $r$ , 晶格常数为  $a$ .

对于空气孔型二维光子晶体, 完全带隙是否存在以及完全带隙的具体位置和带宽大小取决于三个因素: 1) 背景介质折射率; 2) 空气孔归一化半径:  $r/a$ ; 3) 晶格结构.

我们采用平面波展开法计算光子晶体带结构, 介质折射率从 1 以 0.2 的步长增加至 5.4, 同时改变空气孔的归一化半径, 寻找完全带隙的最大带宽, 计算结果如图 1 和图 2 所示.

图 1(a) 所示为空气孔归一化半径  $r/a$  分别为 0.44, 0.45, 0.46, 0.47, 0.48, 0.49 时, 三角晶格空气孔型二维光子晶体完全带隙归一化带宽 (完全带隙宽度与完全带隙中间频率之比) 随介质折射率变化而变化的关系图; 图 1(b) 为三角晶格空气孔型二维光子晶体完全带隙归一化带宽最大值随介质折射

率变化图. 图 2(a) 所示为空气孔归一化半径  $r/a$  分别为 0.47, 0.48, 0.49 时, 正方晶格空气孔型二维光子晶体完全带隙归一化带宽随介质折射率变化而变化的情况; 图 2(b) 为正方晶格空气孔型二维光子晶体完全带隙归一化带宽最大值随介质折射率变化图.

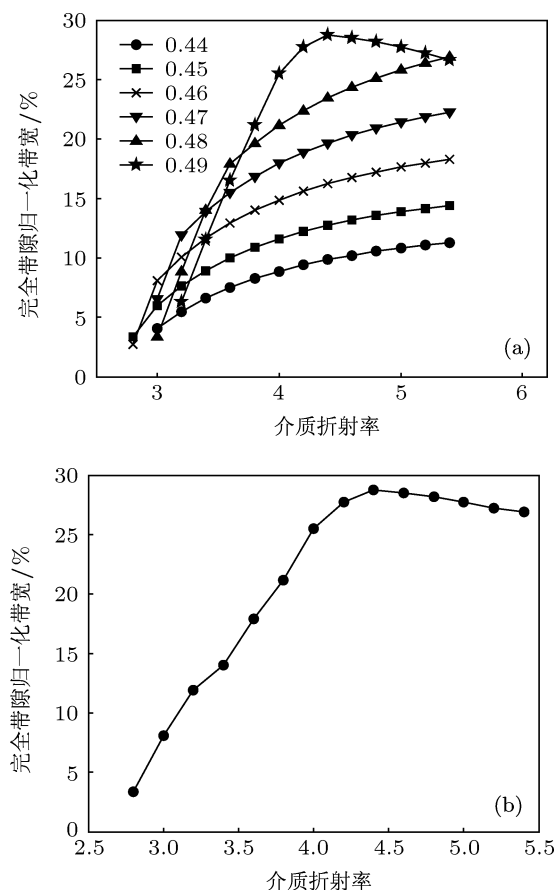


图 1 (a) 空气孔归一化半径  $r/a$  分别为 0.44, 0.45, 0.46, 0.47, 0.48, 0.49 时, 三角晶格空气孔型二维光子晶体完全带隙归一化带宽随介质折射率变化图; (b) 三角晶格空气孔型二维光子晶体完全带隙归一化带宽最大值随介质折射率变化图

由图可知, 首先, 对于三角晶格和正方晶格空气孔型二维光子晶体, 当介质折射率分别大于 2.8 和 3.2 时, 才会有完全带隙出现. 其次, 三角晶格空气孔型二维光子晶体完全带隙归一化带宽的最大值随介质折射率的增加呈现先增加后减小的变化规律, 当介质折射率  $n = 4.4$ , 空气孔半径  $r = 0.49a$  时, 完全带隙归一化带宽达到峰值, 峰值带宽为 28.76%. 正方晶格空气孔型二维光子晶体完全禁带的归一化带宽的最大值随着介质折射率的增加呈现单调递增的变化规律, 介质折射率由 3.2 变化到 5.2 的过程中, 完全带隙归一化带宽最大值由 2.48% 单调递增到 9.48%.

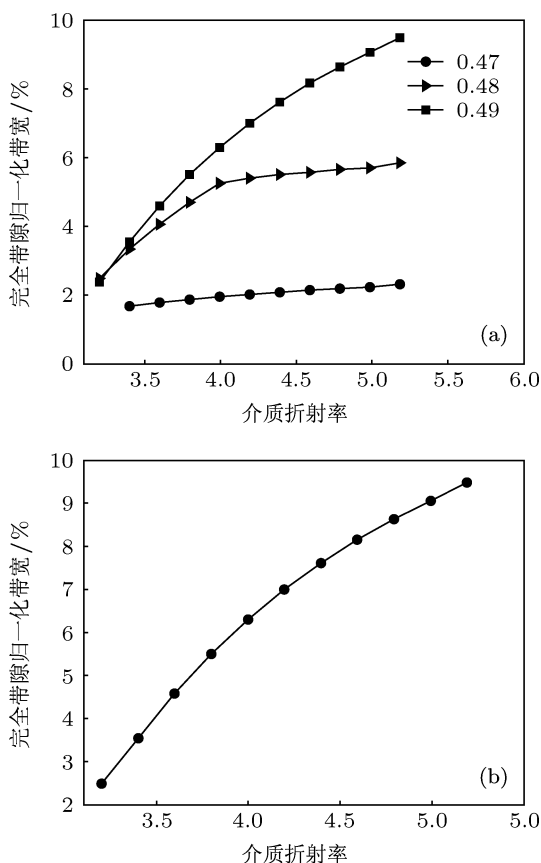


图2 (a) 空气孔归一化半径  $r/a$  分别为 0.47, 0.48, 0.49 时, 正方晶格空气孔型二维光子晶体完全带隙归一化带宽随介质折射率变化图; (b) 正方晶格空气孔型二维光子晶体完全带隙归一化带宽最大值随介质折射率变化图

## 2.2 介质柱型二维光子晶体

接着我们研究介质柱型二维光子晶体的完全带隙特性.

介质柱型二维光子晶体结构参数为: 空气折射率取为 1, 介质折射率为  $n$ , 介质柱半径为  $r$ , 晶格常数为  $a$ .

同样, 对于介质柱型二维光子晶体, 完全带隙是否存在以及具体位置和带宽大小取决于: 1) 介质折射率; 2) 介质柱归一化半径:  $r/a$ ; 3) 晶格结构.

与空气孔型二维光子晶体一样, 我们利用平面波展开法计算光子晶体带结构. 介质折射率从 1 以 0.2 步长增加至 5.4, 同时改变介质柱归一化半径, 寻找完全带隙最大值, 计算结果如图 3 所示. 由图可知, 对于正方晶格介质柱型二维光子晶体, 当介质折射率大于 3.7 时, 才会有完全带隙出现, 完全带隙归一化带宽的最大值随着介质折射率的增加呈现先增大后减小的变化规律, 当介质折射率  $n = 4.4$ , 介质柱半径  $r = 0.40a$  时, 完全带隙归一化带宽取得峰值, 峰值带宽为 6.41%. 对于三角晶格

介质柱型二维光子晶体, 在折射率计算范围内没有观察到完全带隙的出现, 因此对于介质柱型二维光子晶体, 我们只给出了正方晶格完全带隙特性,

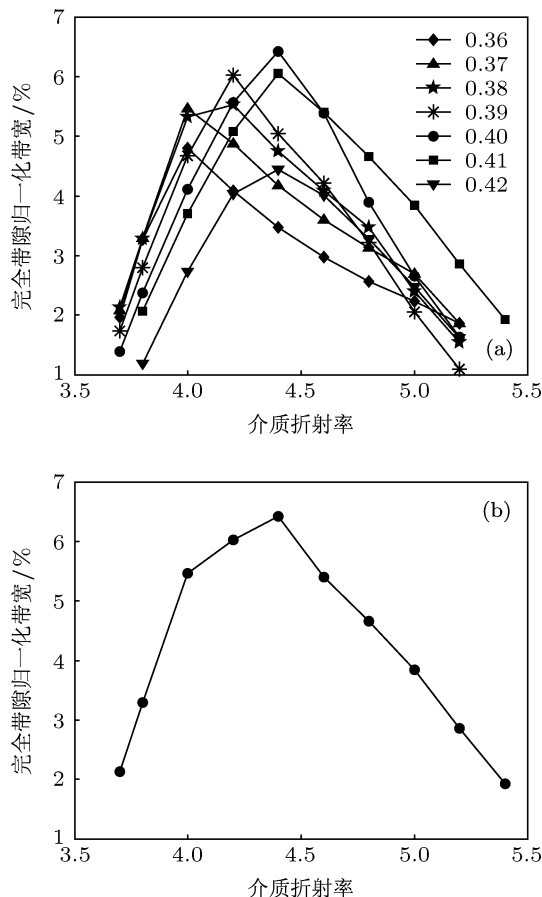


图3 (a) 介质柱归一化半径  $r/a$  分别为 0.36, 0.37, 0.38, 0.39, 0.40, 0.41, 0.42 时, 正方晶格介质柱型二维光子晶体完全带隙归一化带宽随介质折射率变化图; (b) 正方晶格介质柱型二维光子晶体完全带隙归一化带宽最大值随介质折射率变化图

## 2.3 空气环二维光子晶体

对于空气环型二维光子晶体, 我们首先研究三角晶格空气环型二维光子晶体完全带隙随结构参数 (介质折射率、空气环归一化内径、空气环归一化外径) 变化而变化的规律情况, 并将其与三角晶格空气孔型二维光子晶体完全带隙特性进行比较.

图 4(a) 所示为三角晶格空气环型二维光子晶体结构示意图. 空气环内径为  $r$ , 外径为  $R$ , 空气折射率为 1, 介质折射率为  $n$ , 晶格常数为  $a$ .

相较于空气孔型和介质柱型二维光子晶体, 空气环二维光子晶体的带结构受四个因素影响: 1) 介质折射率; 2) 空气环归一化内径:  $r/a$ ; 3) 空气环归一化外径:  $R/a$ ; 4) 晶格结构.

同上, 我们利用平面波展开法计算光子晶体带

结构, 介质折射率从 1 以 0.2 步长增加至 5.4, 同时改变空气环的外径和内径, 研究空气环型二维光子晶体完全带隙随介质折射率、空气环外径与内径的变化情况。

计算结果表明, 对于三角晶格空气环型二维光子晶体, 完全带隙随介质折射率、空气环内径与外径的变化可分为三种情况: 1) 当介质折射率在 2—2.8 之间变化时, 空气孔型二维光子晶体无法获得完全带隙, 而优化的空气环型二维光子晶体可以获得较宽的完全带隙, 而且当空气环外径大小确定后, 随着空气环内径的增大, 完全带隙具有先增大后减小的变化规律, 如图 4(b) 所示 (以介质折射率  $n = 2.4$  为例)。图 4(b) 所示为折射率  $n = 2.4$ , 空气环外径分别为  $0.485a$ ,  $0.49a$ ,  $0.495a$ ,  $0.50a$  时, 三角晶格空气环型二维光子晶体完全带隙归一化带宽随空气环内径的变化而变化的情况。由图可知, 随着空气环外径的增加, 空气环型二维光子晶体会在更宽的空气环内径取值范围内获得更宽的完全带隙。2) 当介质折射率在 3—4.4 之间变化时, 空气环外径大小确定后, 随着空气环内径的增大, 完全带隙的变化具有先变窄至最小值, 然后再次出现增宽又变窄的规律, 在空气环内径增大的过程中, 通过比较前后出现的完全带隙, 我们发现, 空气环结构所能获得的完全带隙最大带宽小于空气孔结构的所获得的完全带隙的最大带宽, 如图 4(c) 所示 (以介质折射率  $n = 4.0$  为例)。图 4(c) 所示为介质折射率  $n = 4.0$ , 空气环外径分别为  $0.47a$ ,  $0.48a$ ,  $0.49a$  时, 三角晶格空气环型二维光子晶体完全带隙归一化带宽随空气环内径的变化情况。空气环内径为 0 时所对应的为空气孔型结构, 由图可知, 对于空气孔型结构, 当空气孔半径  $r = 0.49a$  时, 完全带隙归一化带宽取得最大值 25.52%; 而对于空气环型结构, 后出现的完全带隙的峰值带宽仅为 19.43%, 此时对应的空气环外径为  $R = 0.47a$ , 内径为  $r = 0.14a$ 。3) 而当介质折射率在 4.5—5.4 之间取值时, 同规律 2) 相同之处在于: 当空气环外径为确定值时, 随着空气环内径的增大, 完全带隙的变化同样具有先变窄至最小值, 然后再次出现增宽又变窄的规律, 而同规律 2) 不同之处在于在空气环内径增大的过程中, 通过比较前后出现的完全带隙峰值可以发现, 空气环结构可以获得更宽的完全带隙, 如图 4(d) 所示 (以介质折射率  $n = 4.8$  为例)。图 4(d) 所示为介质折射率  $n = 4.8$ , 空气环外径分别为  $0.47a$ ,  $0.48a$ ,  $0.49a$  时, 完全带隙归一化带宽随空气环内径的变化图。

由图可以很直观地知道, 空气环结构可以获得更宽的完全带隙。具体来讲, 当空气环内径为 0 时, 对应的为空气孔型结构, 此时当空气孔半径取  $0.49a$  时, 完全带隙归一化带宽取得最大值 28.15%, 而对于空气环型结构, 当外径  $R = 0.48a$ , 内径  $r = 0.13a$  时, 完全带隙归一化带宽达到 31.87%, 比空气孔结构的 28.15% 提高了 13.32%。

图 4(e) 所示为三角晶格空气环型二维光子晶体完全带隙归一化带宽最大值随介质折射率变化图。图 4(f) 为三角晶格空气孔型和空气环型二维光子晶体完全带隙最大值随介质折射率变化的对比图。由图可知, 对于三角晶格空气环型二维光子晶体, 当介质折射率大于 2 时即出现完全带隙, 而对于三角晶格空气孔型二维光子晶体, 当介质折射率大于 2.8 时, 才会出现完全带隙。其次, 虽然当介质折射率在 3—4.4 之间变化时, 空气环型二维光子晶体所获得的完全带隙归一化带宽的最大值要小于空气孔型二维光子晶体所获得的完全带隙归一化带宽的最大值, 但是, 当介质折射率大于 4.4 时, 相较于空气孔型二维光子晶体, 空气环型二维光子晶体可以获得更宽的完全带隙。

最后我们研究正方晶格空气环型二维光子晶体完全带隙随结构参数变化而改变的情况, 并将其与正方晶格空气孔型与介质柱型二维光子晶体的完全带隙特性进行比较, 计算结果如图 5 所示。图 5(a) 所示为正方晶格空气环型二维光子晶体结构示意图。图 5(c) 所示为正方晶格空气环型二维光子晶体完全带隙最大值随介质折射率变化而变化的情况。由图可知: 当介质折射率大于 3.4 时正方晶格空气环型二维光子晶体可以获得较大的完全带隙。研究表明, 空气环外径大小确定后, 随着空气环内径的增大, 完全带隙的变化具有先变窄至消失, 然后再次出现增宽又变窄的规律, 在空气环内径增大的过程中, 通过比较前后出现的完全带隙, 我们发现, 空气环结构可以获得更宽的完全带隙, 如图 5(b) 所示 (以介质折射率  $n = 4.4$  为例)。图 5(b) 所示为介质折射率  $n = 4.4$ , 空气环外径分别为  $0.48a$ ,  $0.49a$  时, 正方晶格空气环型二维光子晶体完全带隙归一化带宽随空气环内径的变化情况。空气环内径为 0 时所对应的为空气孔型结构, 由图可知, 对于空气孔型结构, 当空气孔半径  $r = 0.49a$  时, 完全带隙归一化带宽取得最大值 7.61%, 而对于空气环型结构, 后出现的完全带隙的峰值带宽为 10.06%, 此时对应的空气环外径为  $0.49a$ , 空气环内径为  $0.16a$ 。图

5(d) 所示为正方晶格空气环型、介质柱型、空气孔型二维光子晶体完全带隙归一化带宽最大值随介质折射率变化情况的对比图, 由图我们可以很直观

的知道: 相较于正方晶格空气孔型与介质柱型二维光子晶体, 空气环型二维光子晶体可以获得更宽的完全带隙.

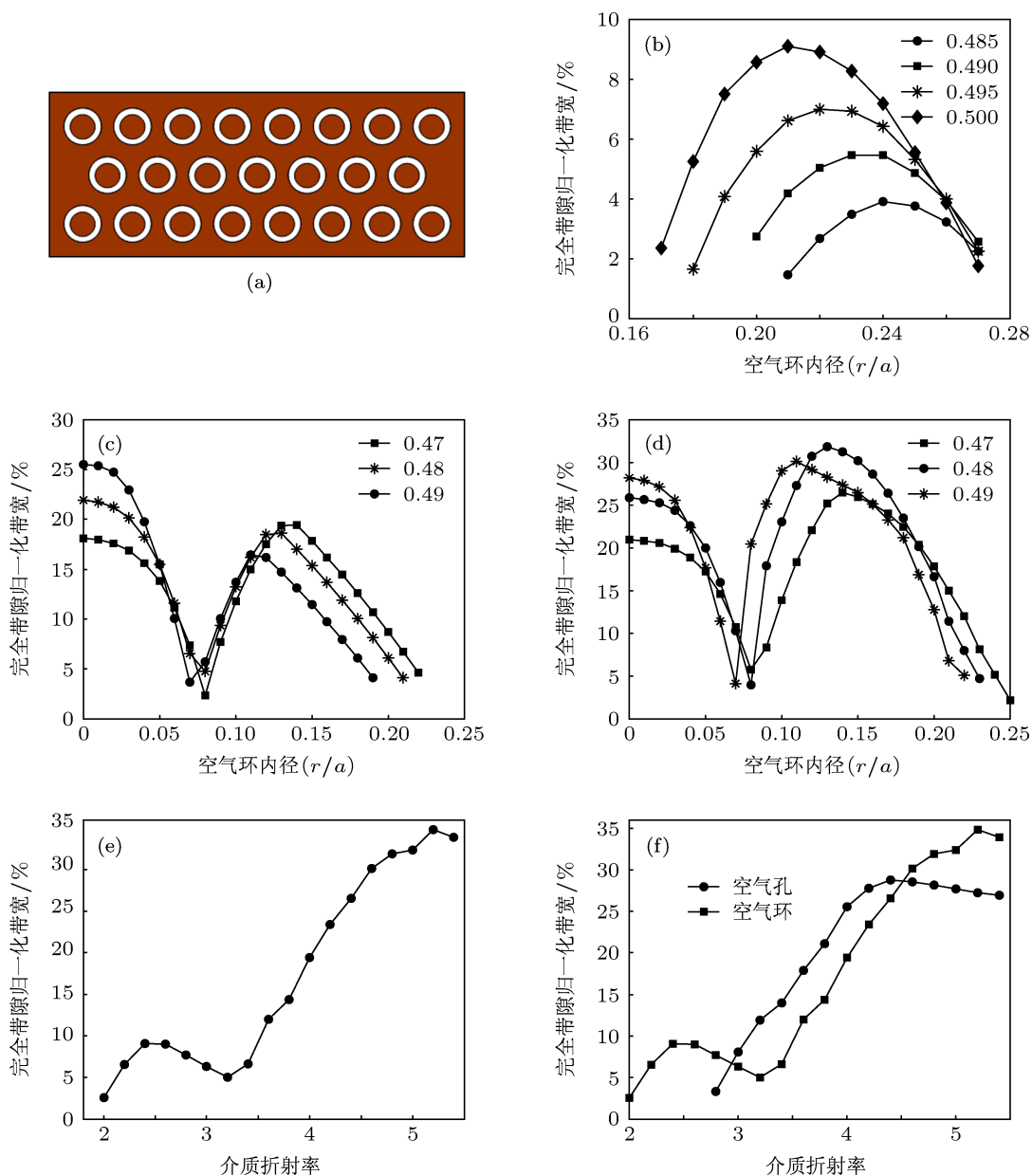


图4 (a) 三角晶格空气环型二维光子晶体结构示意图; (b) 介质折射率  $n = 2.4$ , 空气环外径分别为  $0.485a$ ,  $0.490a$ ,  $0.495a$ ,  $0.50a$  时, 三角晶格空气环型二维光子晶体完全带隙归一化带宽随空气环内径的变化图; (c) 介质折射率  $n = 4.0$ , 空气环外径分别为  $0.47a$ ,  $0.48a$ ,  $0.49a$  时, 完全带隙归一化带宽随空气环内径的变化图; (d) 介质折射率  $n = 4.8$ , 空气环外径分别为  $0.47a$ ,  $0.48a$ ,  $0.49a$  时, 完全带隙归一化带宽随空气环内径的变化图; (e) 三角晶格空气环型二维光子晶体完全带隙归一化带宽最大值随介质折射率变化对比图; (f) 三角晶格空气孔型和空气环型二维光子晶体完全带隙最大值随介质折射率变化对比图

综上所述, 相较于普通的空气孔型与介质柱型光子晶体, 空气环型光子晶体可以获得更宽的完全带隙, 而且当介质折射率较低时, 空气环型光子晶体可以获得空气孔型与介质柱型光子晶体在低折射率条件下所无法获得的完全带隙. 因而, 空气环型二维光子晶体更有利于完全带隙的产生.

空气环型二维光子晶体之所以更容易产生完全带隙可以从以下两方面来说明: 本文研究的空气环型光子晶体可以看作是在空气背景中呈周期性排列的介质柱 (即介质柱型光子晶体) 与在介质背景中呈周期性排列的空气孔 (即空气孔型光子晶体) 的结合. 一方面, 相较于上述两类常用的光子

晶体结构, 空气环型光子晶体结构在一定程度上降低了结构的对称性, 增强了结构对光的散射能力, 从而更易获得光子带隙. 另一方面, 我们知道介质柱型光子晶体更有利于 TM 偏振光的光子带隙的形成, 空气孔型光子晶体更有利于 TE 偏振光的光子带隙的形成, 空气环型光子晶体作为这两类光子晶体结构上的组合, 同时具有这两类光子

晶体的优点. 在实际计算其能带结构时, 由于空气环结构还有两个可以同时独立调节的结构参数: 空气环的内径大小和外径大小, 比空气孔结构和介质柱结构多一个自由度, 因而通过调节空气环内外径的大小以及介质介电常数可以使得 TE 模光子带隙与 TM 模光子带隙发生重合, 获得完全带隙.

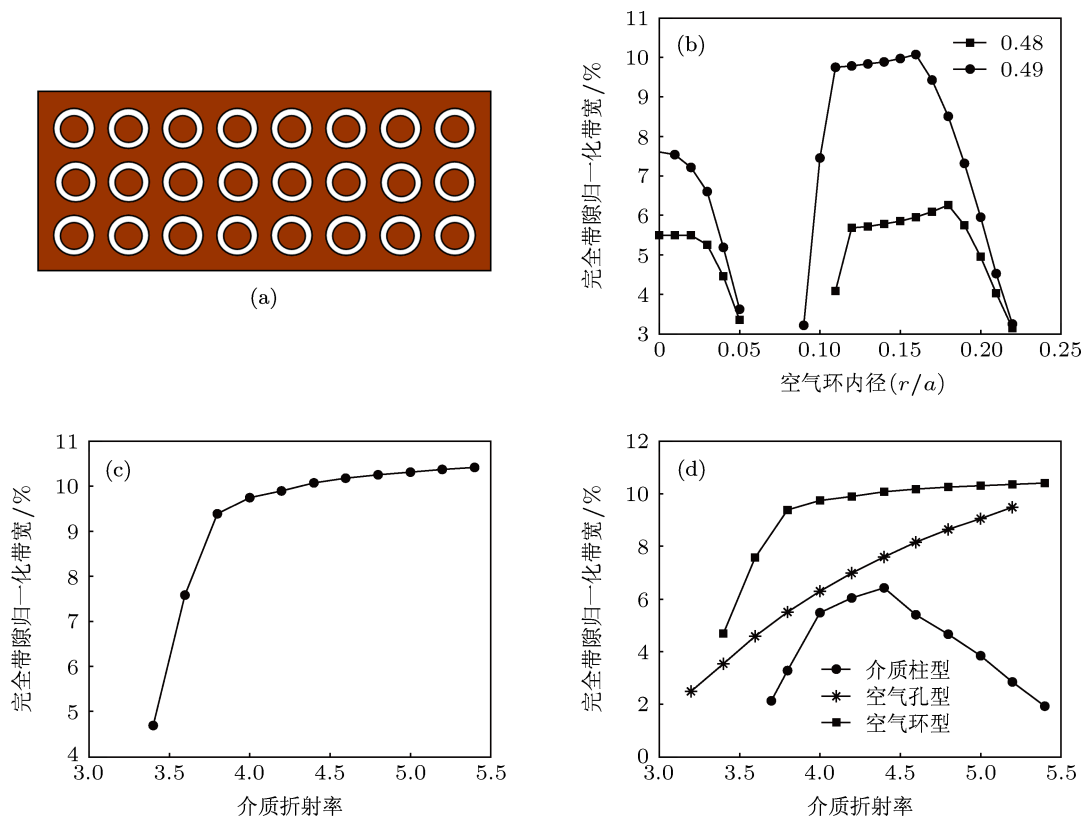


图5 (a) 正方晶格空气环型二维光子晶体结构示意图; (b) 介质折射率  $n = 4.4$ , 空气环外径分别为  $0.48a$ ,  $0.49a$  时, 正方晶格空气环型二维光子晶体完全带隙归一化带宽随空气环内径的变化图; (c) 正方晶格空气环型二维光子晶体完全带隙归一化带宽最大值随介质折射率变化情况; (d) 正方晶格空气孔型、介质柱型和空气环型二维光子晶体完全带隙最大值随介质折射率变化对比图

### 3 结论

本文采用平面波展开法, 系统研究了空气环型二维光子晶体完全带隙随结构参数变化而改变的规律情况, 并将其与普通的空气孔型和介质柱型二维光子晶体的完全带隙特性进行了比较. 研究表明, 相较于普通的空气孔型和介质柱型二维光子晶体, 空气环型二维光子晶体可以获得更宽的完全带隙. 比如当介质折射率  $n = 4.4$  时, 正方晶格的空气孔型、介质柱型和空气环型二维光子晶体可以获得的完全带隙最大值分别为  $7.61\%$ ,  $6.41\%$  和  $10.06\%$ .

对于三角晶格空气孔型和空气环型二维光子晶体, 当介质折射率  $n = 4.8$  时, 其可以获得的完全带隙最大值分别为  $28.15\%$  和  $31.87\%$ . 因此, 空气环型二维光子晶体可以用以获得更宽的完全带隙. 而且, 当介质折射率较低时, 空气环型二维光子晶体可以获得普通介质柱型和空气孔型二维光子晶体在低折射率时所无法获得的完全带隙. 比如, 对于三角晶格空气孔型二维光子晶体, 当介质折射率大于  $2.8$  时才会出现完全带隙, 而对于三角晶格空气环型二维光子晶体, 当介质折射率大于  $2$  时即可获得完全带隙.

- [1] Liu S H, Li C F 2006 *Photonics Technology and Application* (Vol. 1) (Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press) p587 (in Chinese) [刘颂豪, 李淳飞 2006 光子学技术与应用 (上卷) (广州: 广东科技出版社) 第 587 页]
- [2] Fan S H, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, Haus H A 1998 *Optics Express* **3** 4
- [3] Qiu M, Jaskorzynska B 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 1074
- [4] Chutinan A, Noda S 2000 *Phys. Rev. B* **62** 4488
- [5] Vlasov Y A, O'Boyle M, Hamann H F, McNab S J 2005 *Nature* **438** 65
- [6] Akahane Y, Asano T, Song B S, Noda S 2003 *Nature* **425** 944
- [7] Yoshie T, Scherer A, Hendrickson J, Khitrova G, Gibbs H M, Rupper G, Ell C, Shchekin O B, Deppe D G 2004 *Nature* **432** 200
- [8] Feng S S, Shen L F, He S L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1540 (in Chinese) [冯尚申, 沈林放, 何赛灵 2004 物理学报 **53** 1540]
- [9] Hou J, Citrin D S, Wu H, Gao D S, Zhou Z P 2011 *Opt. Lett.s* **36** 2263
- [10] Li Z Y, Gu B Y, Yang G Z 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 2574
- [11] Zhuang F, He S L, He J P, Feng S S 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 355 (in Chinese) [庄飞, 何赛灵, 何江平, 冯尚申 2002 物理学报 **51** 355]
- [12] Susa N 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 3501
- [13] Wang R Z, Wang X H, Gu B Y, Yang G Z 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 4307
- [14] Anderson C M, Giapis K P 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 2949
- [15] Kurt H, Citrin D S 2005 *Optics Express* **13** 10316

## Study on complete photonic band gaps of two-dimensional air annular photonic crystals\*

Liu Hui<sup>1)3)</sup> Liu Dan<sup>2)</sup> Zhao Heng<sup>1)</sup> Gao Yi-Hua<sup>2)3)†</sup>

1) (School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

2) (School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

3) (Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

( Received 23 April 2013; revised manuscript received 21 May 2013 )

### Abstract

Plane wave expansion method was employed to study the complete photonic band gap (PBG) of two-dimensional air annular photonic crystals (PCs). Comparison of the complete PBG of the air annular photonic crystal and the commonly used PCs (square-and triangular- lattice dielectric rods in air and square-and triangular-lattice air holes in dielectric background) reveals that a larger complete PBG can be obtained for the air annular PCs. Furthermore, the complete PBG is observed for the air annular PCs even if the dielectric contrast is low, while it is difficult to achieve a complete PBG for the commonly used PCs. For example, for the square and triangular lattice air-hole PCs, the complete PBG is observed when the refractive index of the dielectric materials is arger than 2.8 and 3.2, respectively. But the complete PBG can be observed when the refractive index is arger than 2 for the air annular PCs.

**Keywords:** two-dimensional air annular photonic crystal, complete photonic band gap, plane wave expansion method

**PACS:** 42.70.Qs, 78.20.Bh

**DOI:** 10.7498/aps.62.194208

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11074082).

† Corresponding author. E-mail: gaoyihua@hust.edu.cn