

液晶调制的光子晶体可控偏光片和光开关

殷建玲¹⁾ 黄旭光^{1)†} 刘颂豪¹⁾ 胡社军²⁾

1) 华南师范大学信息光电子科技学院 广州 510631)

2) 华南师范大学物理与电信工程学院 广州 510631)

(2005 年 12 月 9 日收到, 2006 年 3 月 12 日收到修改稿)

与介质柱型光子晶体相比,空气孔光子晶体更易于制作和集成而更有应用价值.采用平面波展开法证实了填充液晶的二维三角形分布的空气孔光子晶体方向能隙的可调节性.数值模拟结果表明:1)通过外界电场控制空气孔中所填充的相列液晶的方向可以对光子晶体的方向能隙进行调节,这种可调节性可用于制作场敏偏光片.这与 Liu 等人研究介质柱型光子晶体的结论相类似;2)用 phenylacetylene 型液晶替代 5CB 液晶作为填充物质所得到的空气孔光子晶体偏光片可使用的频率范围显著增大.在此基础上,还研究了填充液晶的光子晶体波导传输谱线的可调节性对特定波长的光切断和开通控制的原理,实现了与以往光开关原理不同的光子晶体光开关.

关键词:光子晶体,液晶,可调节性,平面波展开法,场敏偏光片

PACC:4270Q, 7125P

1. 引 言

光子晶体^[1,2]是一种折射率周期性变化的人工介质结构,它对光子具有类似于电子带隙的光子带隙结构,这样的结构对光子具有局域性,即频率处于光子晶体禁带范围内的光不能在光子晶体中传输.但如果在光子晶体中引入线缺陷,原来处于光子晶体禁带中的光就可以沿着这个线缺陷进行传输^[3-7].利用光子晶体的这种对光的控制能力可以设计制作各种光学集成器件,如波长选择滤波器,波分复用器和光开关^[8-10].其中,光开关是光通信系统中的一个重要元件,其主要作用有两个:一是将光纤通道中的光信号切断或开通;二是将某波长的光信号从一个通道转到另一个通道中去.由于光子晶体器件表现出比传统的光学器件尺寸更小,性能更好的特征^[11-13],因此,利用这些特征可以设计新型的小型光子晶体光开关.

另外,如果光子晶体中填充上功能材料,就可以得到可调节的带隙结构.由于外部温度、电场或光折射都可以改变功能材料的折射率,所以填充功能材料的光子晶体波导的光学特性就可以在这些外部条

件的控制下加以调节^[14-18].目前,许多基于这一原理的可控器件都已出现.例如,在 Y 型波导的线缺陷区域填充液晶后,光在不同条件下会分别沿 Y 型波导的两个支臂进行传输;在光子晶体波导定向耦合器的耦合区域填充液晶后,通过调节液晶的旋转方向就可以使光沿着不同耦合臂输出;在 Mach-Zehnder 干涉计的两个臂填充液晶后,通过调节液晶的折射率就可以控制光传输的相位,进而可以实现光开关等等,这些器件都利用液晶实现开关性能^[19-21].故利用液晶的可调节性可以实现光子晶体光开关.但是,这些光开关都是利用液晶折射率的改变来改变两通道的相对相位来实现的,利用液晶控制光子晶体禁带实现的光开关还未见专门报道.最近, Liu 等人从理论上证实在光子晶体中填充液晶后,通过对液晶的折射率进行调制就可以调节光子晶体禁带结构,进而用于制作场敏偏光片^[22],对进一步研究可控的光子晶体器件提供了依据.但是 Liu 等人所研究的结构是介质柱所构成的光子晶体中填充液晶所构成的,而实际上,由半导体上三角形分布的空气孔所构成的光子晶体结构更加牢固可靠,在实验上更容易制作,并且在集成光学上更容易集成,故空气孔光子晶体更有实用价值.因此,研究空气孔

* 广东省自然科学基金(批准号:04010398)和广东省自然科学基金重点项目(批准号:05100534)及国家教育部留学回国人员科研启动基金资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: huangxg@senu.edu.cn

光子晶体禁带结构的可调节性具有现实意义.另外, Liu 等人通过在介质柱光子晶体中填充 5CB 型液晶所得到的偏光片的频率使用范围很小,这离实际需求比较远,故有必要探寻光子晶体能隙变化更大,频率使用范围更大的偏光片.

实际上,当光子晶体中填充液晶后,电磁场相当于在各向异性光子晶体中传输,在这种情况下必须考虑所有传播方向,即整个 Brillouin 区在所有偏振模式下的能带结构^[23-25].这时,横电模(TE)和横磁模(TM)的分离被打破,也就是说对于各向异性光子晶体的禁带还必须同时考虑这两种模式的共同结果,才可以充分描述其能隙结构.当然,并非所有的各向异性光子晶体都在整个 Brillouin 区具有能隙结构,有些各向异性光子晶体仅在部分 Brillouin 区上具有方向能隙,甚至还只是对某种偏振模式具有方向能隙.但是,对于实际的应用而言,方向能隙也是非常具有实用价值的.

本文在理论上证实了填充液晶的三角形分布的空气孔型二维光子晶体方向能隙的可调节性.模拟结果表明,在外界电场的影响下,液晶的旋转方向会发生改变,从而使空气孔光子晶体方向能隙会像填充液晶的柱型光子晶体那样发生改变,因此,也可以像 Liu 等人^[22]指出的那样利用方向能隙的可控性来制作场敏偏光片.但值得强调的是,本文所讨论的是空气孔光子晶体,这种光子晶体在实验上更容易实现和集成,故更有实用价值;并且本文的研究表明采用 phenylacetylene 型液晶替代 Liu 等人所填充的 5CB 型液晶填充到空气孔光子晶体中所得到的偏光片可使用的频率范围明显增大.另外,本文进一步从理论上证实,光子晶体方向能隙的可调节性还会引起含线缺陷的光子晶体波导的传输光谱发生改变,利用这一原理可以制作对不同波长的光进行切断和开通控制的结构非常简单的光开关,如,对 $1.55\mu\text{m}$ 波

长的光实现开关控制,而允许 $1.31\mu\text{m}$ 波长的光始终通过的光开关.

2. 计算方法

通常用平面波展开法来计算光子晶体的禁带结构,它的基本思想是将电磁场以平面波的形式展开,从而将麦克斯韦方程组化成一个本征方程,求解该方程的本征值就得到所传播的光子的本征频率.在光子晶体中填充液晶后,在其内传输的电磁场就会受到液晶旋转方向的影响,因此,对于填充液晶的二维光子晶体,在其内传输的电磁波满足下面的方程:

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times \mathbf{H}(r) \right] = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \mathbf{H}(r), \quad (1)$$

其中电介质张量 $\epsilon(r) = \epsilon(r+R)$ 是与基本变换所产生的晶格矢量有关的周期性变化的函数, $\nabla \cdot \mathbf{H}(r) = 0$.

由于液晶具有双折射特性,所以它通常有两种介电系数:一种是正常介电系数 ϵ^o ,另一种是反常介电系数 ϵ^e .对于本文所讨论的空气孔光子晶体,在其内传输的光主要是横电模(TE)即电场在二维光子晶体 $x-z$ 平面内,而假设液晶的指向矢沿 $x-z$ 平面,如图 1 所示.当光波的电场方向垂直于液晶的指向矢时,液晶呈现正常折射率,而当电场的方向平行于液晶的指向矢时,液晶呈现反常折射率.在二维平面中,相列型液晶的介电张量元可以描述如下:

$$\epsilon_{xx}(r) = \epsilon^o(r) \sin^2 \phi + \epsilon^e(r) \cos^2 \phi, \quad (2)$$

$$\epsilon_{zz}(r) = \epsilon^o(r) \cos^2 \phi + \epsilon^e(r) \sin^2 \phi, \quad (3)$$

$$\epsilon_{xz}(r) = \epsilon_{zx}(r) = [\epsilon^e(r) - \epsilon^o(r)] \cos \phi \sin \phi, \quad (4)$$

其中, ϕ 是液晶指向矢的旋转角,而 $n = (\cos \phi, \sin \phi)$ 是液晶指向矢.

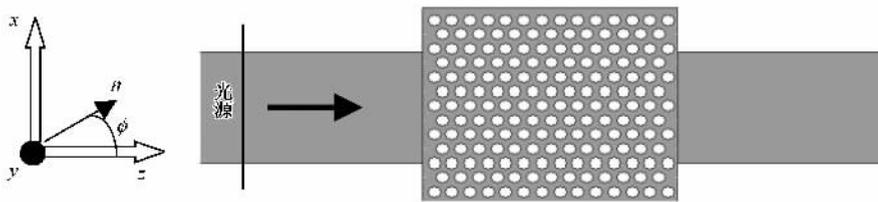


图 1 二维三角形分布的空气孔光子晶体,孔中填充液晶

因此,填充液晶的光子晶体相当于各向异性光子晶体.对于各向异性光子晶体,必须考虑整个

Brillouin 区上对所有偏振模式的能隙结构,对特定传播方向上存在的能隙结构仅仅是方向能隙^[23-25].

由 Li 等人的讨论可知^[23-25], 本文所讨论的沿 z 传播方向能隙结构是方向能隙结构.

对于 5CB 型液晶, 其正常折射率和反常折射率分别为 $n_{LC}^o = 1.522$ 和 $n_{LC}^e = 1.706$. 对于 phenylacetylene 型液晶^[26], 其正常折射率和反常折射率分别为 $n_{LC}^o = 1.590$ 和 $n_{LC}^e = 2.223$. 一般情况下, 单液晶物质的中间态温度范围都非常有限, 例如 5CB 液晶的温度范围是 $24^\circ\text{--}35.3^\circ$, 这种液晶的工作范围正好处于室温条件下, 故适合作为集成器件的工作物质, 假设 5CB 液晶的工作温度是室温条件并忽略吸收损耗.

有限时域差分法 (the finite-difference time-domain, 简称 FDTD) 最早由 Yee 在 1966 年提出^[27], 它利用有限差分法对含时的 Maxwell 方程直接求数值解. 二维 FDTD 法可研究光在填充液晶的二维光子晶体波导中的传输特性. 对于本文所讨论的填充液晶的光子晶体, 光相当于在各向异性光子晶体中传输, 通过将方程(2)–(4)带入方程(1)中并用 FDTD 法进行求解, 就可以对光在丢失一排空气孔的填充液晶光子晶体波导中的传输进行分析^[20, 22, 28]. 边界采用完美匹配层边界条件(perfectly

matched layer boundary condition). 光子晶体置 $x\text{--}z$ 于平面, 采用高斯脉冲光束作为入射光束并沿着 z 方向传输, x 和 z 方向的步长分别是 Δx 和 Δz , 通常每个波长需 10—20 步, 这里取 x, z 方向的步长分别为 $\Delta x = 0.07, \Delta z = 0.07$. 关于 FDTD 法的详细讨论可参见文献 [27].

3. 数值模拟与分析

3.1. 填充 5CB 液晶的光子晶体在光传播方向的带结构分析

本部分将通过平面波展开法对填充 5CB 液晶的二维三角形分布的空气孔光子晶体的带结构进行分析, 入射平面波从光子晶体的左侧入射, 沿 z 方向射到放置于 $x\text{--}z$ 平面的光子晶体上. 未填充液晶前的光子晶体各参数如下: 晶格常数为 a , 基底的介电常数为 $\epsilon = 3.4$ (Si), 空气柱半径为 r , 且 $r/a = 0.35$. 利用平面波展开法计算填充 5CB 液晶的光子晶体在 z 传播方向上带结构, 如图 2 所示.

由图 2 可知, 无论是 5CB 液晶的旋转角为 0° 还

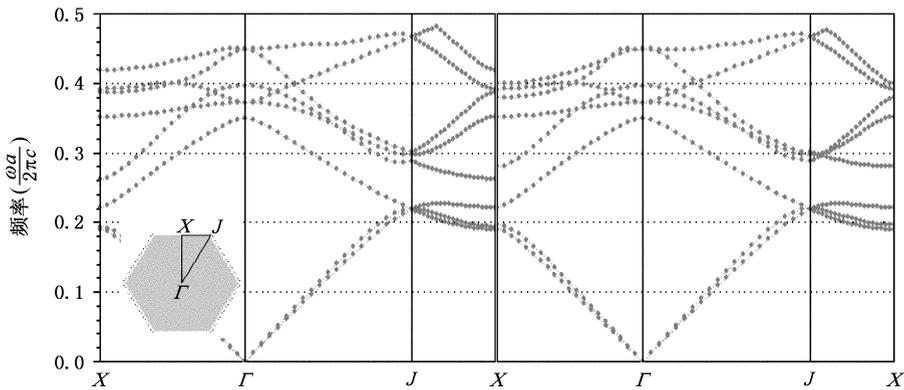


图 2 填充 5CB 液晶的旋转角分别为 0° 和 90° 的光子晶体带结构. 左图为 5CB 液晶的旋转角为 0° 的情况, 右图为旋转角为 90° 的情况.

是 90° , 填充 5CB 液晶的光子晶体在 z 传播方向都不存在能隙, 因此, 对整个 Brillouin 区就更不存在能隙, 即在所有传播方向上不存在能隙结构. 这种方向能隙的不存在是由于两种偏振模式 TE 模和 TM 模没有公共的能隙部分. 但是这种光子晶体在 z 方向对 TE 模的光存在方向能隙, 如图 3 所示.

由图 3 可以看出, 当三角形分布的空气孔光子晶体中没有填充液晶时, 它对 TE 模的能隙范围比填充液晶后对 TE 模的方向带隙要大, 而且有一大

一小两个能隙, 其中较大能隙的归一化频率 ($\omega a/2\pi c$, 其中 ω 是角频率, c 是真空中光速) 范围是 $0.224\text{--}0.333$, 较小能隙的归一化频率范围是 $0.656\text{--}0.672$. 当光子晶体的空气孔中填充液晶后, 这种各向异性光子晶体仅对 TE 模存在方向能隙, 其方向能隙频率范围随液晶旋转角发生改变: 当液晶旋转角为 0° 时, 方向能隙位于 $0.220\text{--}0.280$; 当旋转角为 90° 时, 方向能隙位于 $0.218\text{--}0.262$. 由此可以看出, 三角形分布的空气孔光子晶体填充液晶后,

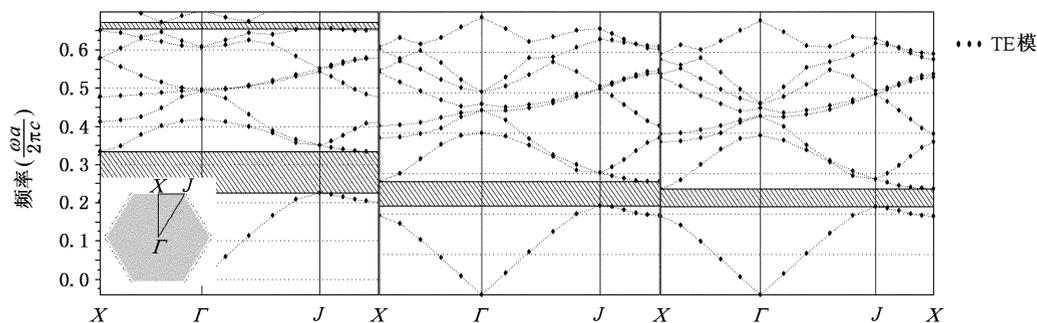


图3 填充5CB液晶的光子晶体的能带结构示意图 其中左图为没有填充液晶的情况,中间的图为5CB液晶的旋转角为 0° 的情况,右图为旋转角为 90° 的情况,▨代表TE模

其方向能隙结构的改变主要表现在以下两个方面:首先,较大方向能隙的上限发生显著改变,而下限的改变则不明显,并且当液晶的旋转角不同时,方向能隙宽度明显不同;其次,填充液晶后,较小的方向能隙消失。

填充5CB液晶的光子晶体对TE模的方向能隙结构不仅与液晶的旋转方向有关,还与 r/a (光子晶体空气孔的半径与晶格常数的比值)有关,如图4所示。

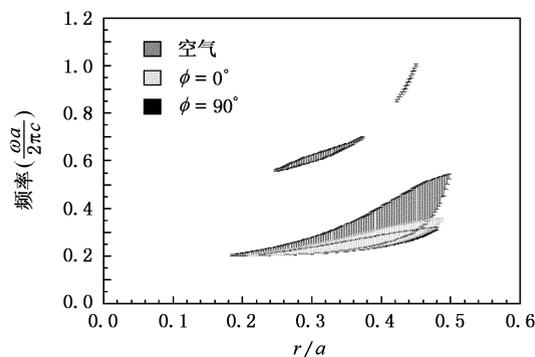


图4 填充5CB液晶的空气孔光子晶体的方向能隙结构随 r/a 的变化

由图4可以看出,三角形分布的空气孔光子晶体中填充液晶后,其方向能隙结构随着 r/a 的变化有以下一些规律:首先,其带隙结构展现出与柱型光子晶体不同的性质,Liu等人所讨论的柱型光子晶体的方向能隙随着半径的增加而变窄,而本文所讨论的空气孔光子晶体的方向能隙则随着半径的增加而变宽;其次,上图不仅给出对通过选择适当的 r/a 来选择方向能隙的频率范围和宽度的指导,还证明三角形分布的空气孔光子晶体的方向能隙结构随着液晶旋转角度而发生,故可以利用液晶来对方向能隙结构进行调制。

对于 $r/a = 0.35$ 的填充5CB液晶的光子晶体,其方向能隙结构随液晶旋转角 ϕ 的改变将由图5更清晰的看出。

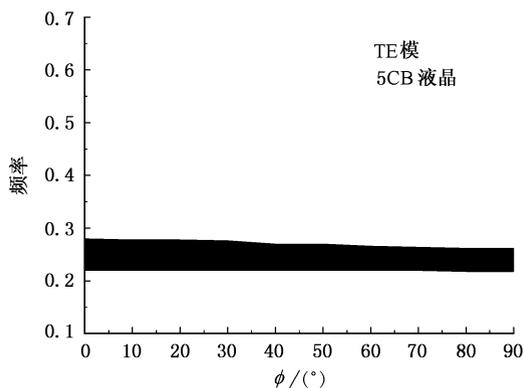


图5 光子方向能隙结构与液晶旋转角 ϕ 的关系曲线图(TE模)($r/a = 0.35$)

由图5可以看出,当液晶的旋转角不同时,光子晶体的方向能隙频率范围也不同,而液晶的旋转角又可以通过外界电场加以调节^[20,22],因此,我们可以通过调节外界电场来对填充液晶的光子晶体的方向能隙进行调节。由于本文所讨论的能隙是仅对TE模存在的方向能隙,对TM模不存在,因此,这个方向能隙仅限制TE模光的通过,而对TM模不起作用,这种可调节性与Liu等人^[22]所讨论的被液晶所包围的柱型光子晶体的情况非常一致,所以也可以作为场敏偏光片来使用:当液晶的旋转角为 90° 时,频率落在 $0.263\text{--}0.280$ 这个范围内的光通过光子晶体后是偏振无关的,TE模和TM模的光可同时通过光子晶体;而当液晶的旋转角为 0° 时,频率落在这个范围内的光是偏振相关的,只有TM模的光可通过光子晶体,TE模的光不能通过。

由上面的分析可知,填充5CB液晶的光子晶体

方向能隙结构随着液晶旋转角的改变,其频率上限发生明显改变,这种改变可以用于设计可调节的场敏偏光片.但是,填充 5CB 液晶的光子晶体方向能隙结构的改变不是很大,而实际应用则期望光子晶体的方向能隙结构发生较大的变化,因此,本文将对填充高双折射率的 phenylacetylene 型液晶的光子晶体的方向能隙结构进行分析,以期获得较大的方向能隙改变.

3.2. 填充 phenylacetylene 型液晶的光子晶体在光传播方向的带结构的可调节性分析

同理,采用平面波展开法对填充 phenylacetylene 型液晶的光子晶体的方向能隙结构随液晶旋转角的变化进行分析,其中,光子晶体的基本参数同前.通过平面波展开法也可计算填充 phenylacetylene 液晶的光子晶体在 z 方向上的带结构,如图 6 所示.

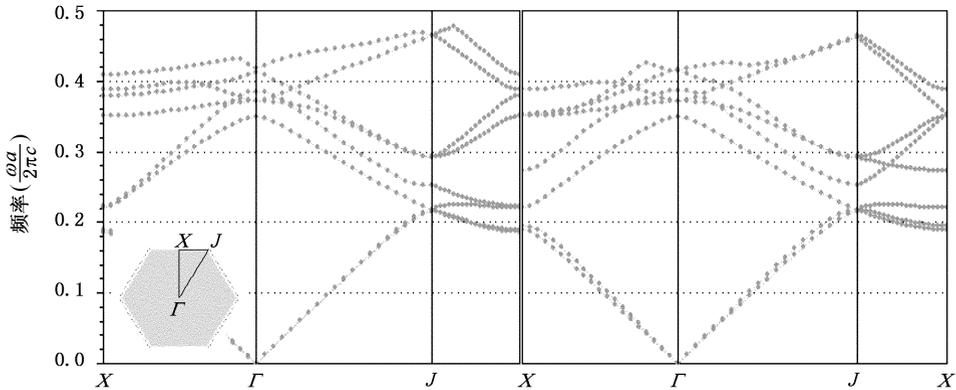


图 6 填充 phenylacetylene 液晶的旋转角分别为 0° 和 90° 的光子晶体带结构.左图为 phenylacetylene 液晶的旋转角为 0° 的情况,右图为旋转角为 90° 的情况

由图 6 可知,类似于填充 5CB 液晶的光子晶体,填充 phenylacetylene 液晶的光子晶体在整个 Brillouin 区上(即在所有传播方向上)也不存在光子晶体所特

有的能隙结构.但是这种光子晶体在 z 方向对 TE 模的光仍存在方向能隙,如图 7 所示.

对比图 7 和图 3 可知,填充 phenylacetylene 型液

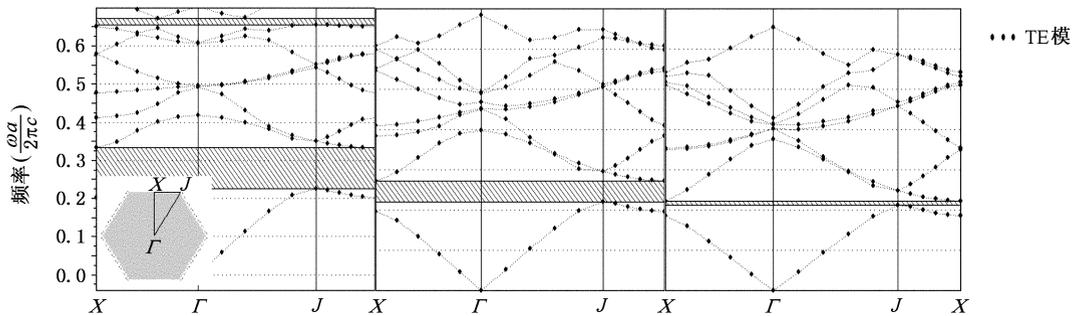


图 7 填充 phenylacetylene 液晶的光子晶体在光传播方向的带结构示意图.其中左图为没有填充液晶的情况,中间的图为 phenylacetylene 液晶的旋转角为 0° 的情况,右图为旋转角为 90° 的情况,▨代表 TE 模

晶的三角形分布的空气孔光子晶体方向能隙随液晶旋转角的变化非常明显,其变化幅度远远大于填充 5CB 液晶的情况,如,当旋转角为 0° 时,方向能隙范围位于 $(0.220-0.272)$,而当旋转角为 90° 时,方向能隙范围位于 $(0.212-0.222)$,上限变化约 0.05,光子晶体方向能隙的可调节范围得到了极大的改进,这种方向能隙上限变化范围的大小直接影响到偏光片的使用范围,当液晶旋转角为 0° 和 90° 时,都不再

存在较小的方向能隙.

与填充 5CB 液晶的光子晶体方向能隙特点类似,填充 phenylacetylene 液晶的光子晶体对 TE 模的方向能隙结构也与 r/a (光子晶体空气孔的半径与晶格常数的比值)有关,如图 8 所示.

由图 8 可以看出,三角形分布的空气孔光子晶体中填充 phenylacetylene 型液晶后,其方向能隙结构随着 r/a 的变化除与填充 5CB 液晶相同的规律外,

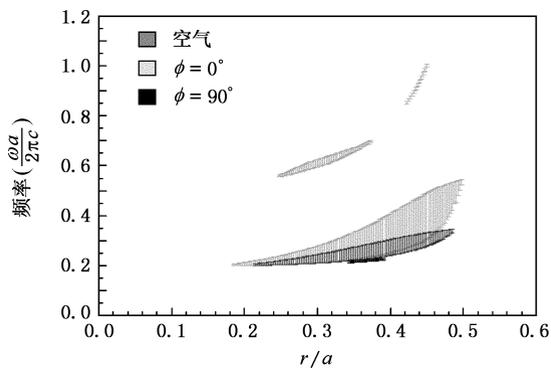


图8 填充 phenylacetylene 液晶的空气孔光子晶体的方向能隙结构随 r/a 的变化

还表现出较大的差别,主要体现在随着旋转角的改变,填充 phenylacetylene 型液晶的光子晶体的方向能隙宽度变化得比较大,这也就意味着方向能隙调制范围变大。

对于 $r/a = 0.35$ 的填充 phenylacetylene 液晶的光子晶体,其方向能隙结构随液晶旋转角 ϕ 的改变将由图9更清晰的看出。

由图9可知,填充 phenylacetylene 型液晶的光子晶体方向能隙随液晶旋转角改变的变化幅度远大于填充 5CB 液晶的情况,也比 Liu 等人^[22]所讨论的填充 5CB 液晶的介质柱光子晶体的方向能隙变化范围要大得多:如, Liu 等人所讨论的填充 5CB 液晶的三角形分布的介质柱光子晶体偏光片的使用范围是 0.3189—0.3488,矩形分布的光子晶体偏光片的使用范围是 0.2819—0.3109;而本文所讨论的填充 phenylacetylene 型液晶的空气孔光子晶体偏光片的使用范围则是 0.222—0.272,因此,填充 phenylacetylene 型液晶的空气孔光子晶体作为场敏偏光片的工作范围得到明显改进,其频率使用范围

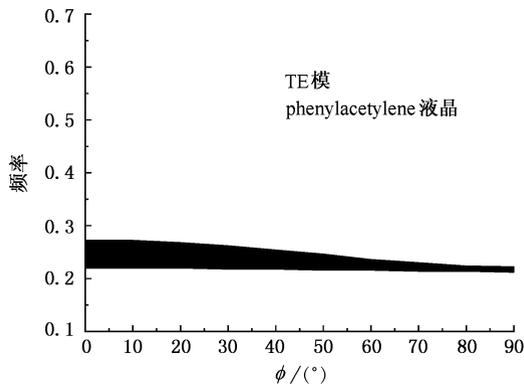


图9 光子方向能隙结构与液晶旋转角 ϕ 的关系曲线图(TE 模)

显著增大。

4. 可调节的切断型光子晶体波导光开关

如果利用光子晶体带隙结构的可调节性来控制某个频率范围的光在能隙以内和以外发生移动,就可以实现光开关。类似地,方向能隙的可调节性在特定方向上也可以实现开关作用:三角形分布的空气孔光子晶体填充液晶后,它的方向能隙随着液晶折射率的改变和改变,故引入单线缺陷所构成的光子晶体波导的传输谱线也会随着液晶折射率的改变而发生变化,从而实现光开关。

本文采用 FDTD 法对光在填充液晶的光子晶体波导中的传输^[20, 22, 28]进行分析:当液晶的旋转角为 0° 时, x 方向为反常介电常数, z 方向为正常介电常数,当液晶的旋转角为 90° 时,则反之。采用高斯脉冲光束作为入射光束,并沿 z 方向入射,取 x, z 方向的步长分别为 $\Delta x = 0.07, \Delta z = 0.07$ 分别对液晶的旋转角取 0° 和 90° 的情况进行计算,就可以得到填充

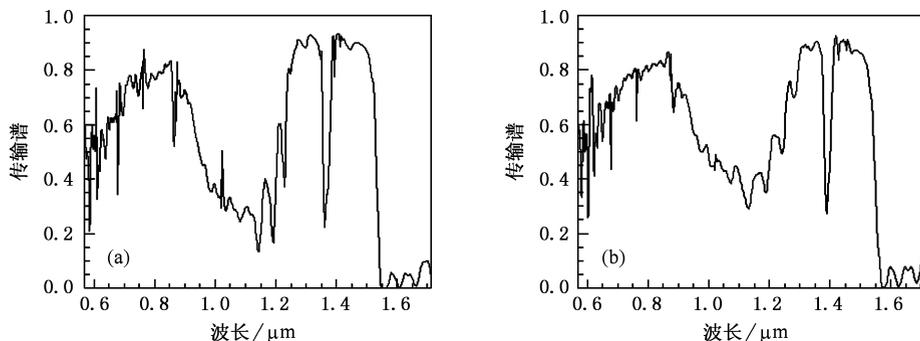


图10 填充 5CB 液晶的的光子晶体波导的 TE 模传输谱线 (a)为液晶旋转角为 0° 的情况($n = 1.522$)(b)为液晶旋转角为 90° 的情况($n = 1.706$)其中 $a = 0.3418, r/a = 0.35$

液晶的光子晶体单线缺陷波导的传输谱线.其中,光子晶体的基本参数同上,对于填充 5CB 液晶的情况,取 $a = 0.3418\mu\text{m}$.

由图 10 可以看出,当液晶的旋转角不同时,填充 5CB 液晶的光子晶体波导的传输谱线发生变化,特别是对于 $1.55\mu\text{m}$ 波长的光,归一化的传输功率由 0.0002504 变为 0.344373,而对 $1.31\mu\text{m}$ 波长的光,归一化的传输功率仅仅由 0.926408 变为 0.885167.这说明当液晶的旋转方向不同时,这种简单的结构可以对 $1.55\mu\text{m}$ 波长的光实现切断或开通的功能,而允许 $1.31\mu\text{m}$ 波长始终通过,即当液晶的旋转角为 0° 时,这种波导中只通过波长为 $1.31\mu\text{m}$ 的光,而当液晶的旋转角为 90° 时,波导中可同时通过波长为 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 的光.因此,利用填充液晶的三角形分布的空气孔光子晶体所构成的单线缺陷波导可以直接作为波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的光的开关.

但是,填充 5CB 液晶的光子晶体波导对 $1.55\mu\text{m}$ 波长的光的通过率只有 0.344373,这对于实际应用来说功率损耗过大,故有必要探讨透过率更高的光开关器件,而探讨透过率高的光开关器件,就要寻找方向能隙结构变化较大的光子晶体.由前面的分析可知,填充 phenylacetylene 型液晶的光子晶体方向能

隙的变化很大,故以其为基础的光子晶体波导的传输谱线的变化应该也更大.下面将对填充 phenylacetylene 型液晶的光子晶体的传输谱线进行分析.

由图 11 可以看出,当液晶的旋转角不同时,填充液晶的光子晶体波导的传输谱线发生较大的变化.对于 $1.55\mu\text{m}$ 波长的光,归一化的传输功率由 0.000775762 变为 0.763478;对 $1.31\mu\text{m}$ 波长的光,归一化的传输功率由 0.910991 变为 0.830112.这一结果与填充 5CB 液晶的情况相比, $1.55\mu\text{m}$ 波长的光的透过率得到显著改善,但对 $1.31\mu\text{m}$ 波长的光影响不大,故填充 phenylacetylene 型液晶的光子晶体波导比填充 5CB 液晶的光子晶体波导更适宜做 $1.55\mu\text{m}$ 波长的光开关.

基于填充液晶的空气孔光子晶体波导不仅可以对 $1.55\mu\text{m}$ 的光实现开关性能,适当调节晶格常数就可以设计出对各种不同波长的光实现开关功能的结构非常简单的光开关.另外,填充液晶的空气孔光子晶体波导中所传输的光波的透过率随液晶旋转角的改变而改变,这种光子晶体波导将来还有可能用于设计其他新型的光子晶体器件.

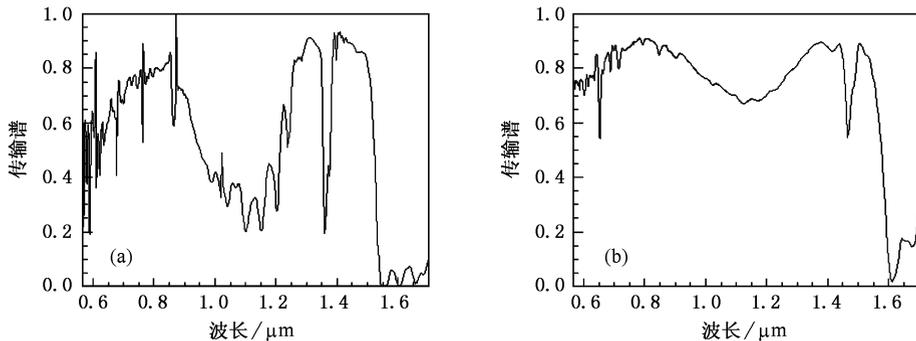


图 11 填充 phenylacetylene 型液晶的光子晶体波导的 TE 模传输谱线 (a)为液晶旋转角为 0° 的情况 ($n = 1.590$) (b)为液晶旋转角为 90° 的情况 ($n = 2.223$),其中 $a = 0.3396$, $r/a = 0.35$

5. 结 论

本文采用平面波展开法对填充液晶的二维三角形空气孔光子晶体在光传播方向的带结构进行数值分析,数值模拟结果证实,这种类型的光子晶体与 Liu 等人所研究的由介质柱周围填充液晶所构成的光子晶体的方向能隙结构的变化规律基本相同,故也可以用于制作场敏偏光片.但是,用 phenylacet-

ylene 型液晶替代 5CB 型液晶作为填充物质的光子晶体制作的场敏偏光片工作范围得到明显改进,其可使用的频率范围显著增大;并且空气孔光子晶体在实验上也更易实现和进行集成.另外,本文还对这种光子晶体所构成的单线缺陷波导的传输谱线进行分析,并证实填充液晶的三角形分布的空气孔光子晶体波导可以用于制作对不同波长的光进行开关控制的结构简单的新型光开关.填充 phenylacetylene 型液晶的光子晶体波导光开关与填充 5CB 液晶的光开

关相比,其开关性能得到极大的改善.另外,这种光子晶体波导将来还可能用于设计新型的光学器件.这些

结论将为进一步研究利用光子晶体方向能隙的可调节性实现可控光子晶体集成器件提供理论依据.

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] Joannopoulos J D, Mead R D, Winn J N 1995 *Photonic Crystal* (Princeton, N J: Princeton University Press)
- [3] Meade R D, Devenyi A, Joannopoulos J D, Alerhand O L, Smith D A, Kash K 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 4753
- [4] Baba T, Fukaya N, Yonekura J 1999 *Electron. Lett.* **35** 654
- [5] 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]
- [6] Li Y, Zheng R S, Feng Y C, Niu H B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3205 (in Chinese)[李岩、郑瑞生、冯玉春、牛愨笨 2004 物理学报 **53** 3205]
- [7] Zhou M, Cheng X S, Xu J, Zeng Y *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 411 (in Chinese)[周梅、陈效双、徐靖、曾勇等 2005 物理学报 **54** 411]
- [8] Zimmermann J, Kamp M, Forchel A *et al* 2004 *Opt. Commun.* **230** 387
- [9] Sharkawy A, Shi S, Prather D W *et al* 2002 *Opt. Express* **10** 1048
- [10] Koshiba M, Member S 2001 *IEEE J. Lightwave Technology* **19** 1970
- [11] Boscolo S, Midrio M, Someda C G 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 47
- [12] Martinez A, Cuesta F, Marti J 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 694
- [13] Thorhauge M, Frandsen L H, Borel P I 2003 *Opt. Lett.* **28** 1525
- [14] Yoshino K, Shimoda Y, Kawagishi Y, Nakayama K, Ozaki M 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 932
- [15] Takeda H, Yoshino K 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 5958
- [16] Mertens G, Roder T, Matthias H, Marsmann H, Kitzrow H S R *et al* 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3036
- [17] Leonard S W, Mondia J P, van Driel H M *et al* 2000 *Phys. Rev. B* **61** R2389
- [18] Schuller Ch, Klopff F, Reithmaier J P, Kamp M, Forchel A 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 2767
- [19] Takeda H, Yoshino K 2003 *Phys. Rev. B* **67** 073106
- [20] Liu C Y, Chen L W 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1849
- [21] Liu C Y, Chen L W 2004 *Opt. Express* **12** 2616
- [22] Liu C Y, Chen L W 2005 *Phys. Rev. B* **72** 045133
- [23] Li Z Y, Wang J, Gu B Y 1998 *Phys. Rev. B* **58** 3721
- [24] Li Z Y, Gu B Y, Yang G Z 1998 *Phys. Rev. Lett.* **84** 2574
- [25] Li Z Y, Gu B Y, Yang G Z 1999 *Euro. Phys. J. B* **11** 65
- [26] Takeda H, Yoshino K 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 5658
- [27] Taflove A, Hagness S C 1998 *Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time Domain Method* (Boston, MA: Artech House)
- [28] Liu C Y, Chen L W 2005 *Opt. Commun.* **256** 114

Photonic crystal field-sensitive polarizer and switch modulated by nematic liquid crystals^{*}

Yin Jian-Ling¹⁾ Huang Xu-Guang^{1)†} Liu Song-Hao¹⁾ Hu She-Jun²⁾

¹⁾ *School for Information and Optoelectronic Science and Engineering, Guangzhou 510631, China*

²⁾ *School of Physics and Telecom Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510631, China*

(Received 9 December 2005 ; revised manuscript received 12 March 2006)

Abstract

Compared with the photonic crystal (PC) structures composed of Si circular , the PC structures composed of triangular lattice of air holes in a dielectric slab are more easily fabricated and integrated . The tunability of directional band gap in a two-dimensional photonic crystal of air holes in a semiconductor matrix is demonstrated numerically , using the plane wave expansion calculation . Numerical simulations show that the photonic crystal band gaps are modulated by nematic liquid crystals infiltrated in the air holes . Then the band gap can be controlled easily under the influence of the external electric field . So the results can serve as a field-sensitive polarizer . These results are in agreement with that of Liu . However , the tunable field-sensitive polarizer based on the phenylacetylene liquid crystals instead of 5CB liquid crystals has the wider frequency range . Moreover , the transmission spectrum of the photonic crystal infiltrated by liquid crystal is analyzed , using finite difference time domain (FDTD) method . Numerical simulations show that the shift of the spectrum modulated by liquid crystal can be used to design a novel switch .

Keywords : photonic crystals , liquid crystal , tunability , plane wave expansion calculation , field-sensitive polarizer

PACC : 4270Q , 7125P

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province , China (Grant Nos. 04010398 , 05100534) and the Scientific Research Starting Foundation for Returned Overseas Chinese Scholars , Ministry of Education , China .

[†] Corresponding author . E-mail : huangxg@senu.edu.cn