



光诱导平面波导阵列的参数对光波离散动力学行为的影响

刘圣, 张鹏, 肖发俊, 杨德兴, 赵建林*

西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所, 陕西省光信息技术重点实验室, 西安 710072

* 联系人, E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2007-10-05; 接受日期: 2008-04-01

西北工业大学青年教师创新基金、博士论文创新基金(编号: CX200514)和基础研究基金资助项目

摘要 空间频率模式的光子带隙反映了光波在周期性结构中的衍射特性. 以光折变非线性波传输方程为基础, 研究了光折变晶体中光诱导平面波导阵列的光子带隙结构以及其中的 Bloch 波模式和光波传输特性. 详细讨论了光子带隙与光波衍射的关系, 并分析了光诱导平面波导阵列的结构参数对光子带隙结构、Bloch 波模式以及光波线性传输行为的影响. 结果表明: 光波在平面波导阵列中的线性传输行为与反映光子带隙结构的衍射关系密切相关, 通过改变入射条件可以激发出各阶通带的传输模式. 随着阵列写入光强度或波导阵列周期的增大, 光子带隙会变宽, 并且 Bloch 波的能量逐渐向高折射率区集中. 光子带隙的增宽会导致相邻通带的传输模式在 Bragg 角度附近发生分离和突变. 另外, 由于饱和效应的存在, 光强的影响会随光强的增大而趋于平稳.

关键词

光诱导平面波导阵列

光子带隙

Bloch 波

光折变 LiNbO₃ 晶体

近年来, 光波在周期性非连续(离散)系统中的传输行为引起了人们的极大关注^[1~31]. 离散系统中, 光波的传输表现出许多特殊的离散动力学行为, 如离散衍射^[1~5]、Bloch波^[6,7]、反常衍射^[2~4]、反常折射^[4,8]以及非线性离散系统中的离散孤子^[5,9~12,19,23,26,27]和带隙孤子^[13~17,20,22~25]等. 这些不同于均匀光学介质中的传输特征主要源于周期性结构中的光子带隙. 平面光波导阵列本质上是一维光子晶格, 可以利用光子带隙和Bloch波理论来研究其中的光波传输特性. 目前, 光折变晶体中光诱导的波导阵列在离散系统的实验研究中扮演着非常重要的角色. 这是因为仅仅利用毫瓦甚至微瓦量级功率的周期光场的辐照就可以在材料体内诱导出不同结构的波导阵列^[26~34], 并且这种光诱导的波导阵列还可以实时改变或通过电或热的方式固定下来^[35,36]. 另外, 利用光诱导的方式

可以方便地制备(2+1)维波导阵列, 这为二维离散系统的实验观察提供了便利条件^[26~28,33,34]. 迄今为止, 人们提出了多种光折变波导阵列的光诱导方法, 包括多光束干涉^[1,6,8,11,24,25,27,29~33]、阵列孤子^[34]、光学掩模^[12,16,17,19,20,26,28]等方法, 并对其中光波的离散传输特性进行了深入地研究, 实验证实了Bloch波^[6]、晶格孤子及其相互作用^[11,12,16~21,23~27]、随机相位孤子^[29~31]以及可调的正、负折射效应^[8]等. 光波在波导阵列中的这些离散特性使得波导阵列在全光信息处理和光计算以及全光通信等领域有巨大的应用潜力. 本文通过理论分析和数值模拟, 研究光折变晶体中光诱导平面波导阵列的光子带隙结构以及Bloch波, 探讨光子带隙与光波衍射的关系, 并详细讨论结构参数对光子带隙和Bloch波以及光波线性传输行为的影响.

1 理论模型

光波在平面波导阵列中的传输行为可采用基于离散Schrödinger方程的耦合模理论来描述. 这种耦合模理论可以直观地解释一维周期结构中的光波传输行为^[2-5], 但缺少普适性, 不能完全定量分析其中的传输模式. 更为严格的描述方法是Bloch理论, 早在1977年, Yeh等人^[37]采用Bloch理论预言了波导阵列中空间频率模式光子带隙的存在. 对于光折变晶体中的光诱导平面波导阵列来说, 光子带隙结构及其对应的Bloch波模式可以采用光折变非线性波传输方程结合平面波法来求解.

设光折变晶体中诱导平面波导阵列的写入光场的强度分布为

$$I = I_0 \cos^2(\pi x/d), \quad (1)$$

式中 I_0 为光强幅值, d 为光场的周期. 在稳态情形下, 当扩散效应可以忽略时, 晶体中归一化折射率变化分布可表示为^[38]

$$\Delta n = E \frac{I}{1+I}, \quad (2)$$

式中 E 表示外加电场或光伏场的强度. 在傍轴近似条件下, 探测光波在平面波导阵列中的线性传输过程可以由如下的无量纲方程描述^[38]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B(x, z)}{\partial z} - \frac{i}{2} \frac{\partial^2 B(x, z)}{\partial x^2} + k_x \frac{\partial B(x, z)}{\partial x} \\ = i(\Delta n - k_x^2) B(x, z), \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $B(x, z)$ 为探测光波的复振幅分布, 归一化参量 x, z 和 E 与实际参量 x', z' 和 E_0 之间的关系分别为 $x' = \alpha^{-1/2}x$, $z' = zk/\alpha$ 和 $E_0' = EE_0$, 其中 $\alpha = kn_e^2 \gamma_{33} E_0$, k 为晶体中的波矢, k_x 表示横向传播常数, n_e 为晶体的非常光折射率, γ_{33} 为晶体的电光系数, E_0 为电场的归一化常数.

假设处于非敏感波段的一维探测光在波导阵列中传输, 则其传播模式可以表示为 $B(x, z) = u(x) \exp(i\beta z)$, 其中 β 为传播常数. 代入(3)式可得

$$\beta u(x) = u(x) \Delta n + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + 2ik_x \frac{\partial}{\partial x} - k_x^2 \right) u(x). \quad (4)$$

(4)式为一个本征值-本征函数问题, 本征函数 $u(x)$ 即为本征值 β 对应的 Bloch 波模式. 通过平面波法求解本征方程(4)就可以得到 $\beta-k_x$ 的关系(即光波的衍射关

系)和 Bloch 波模式.

2 光子带隙及衍射关系

现以LiNbO₃晶体为例, 对光折变晶体中光诱导平面波导阵列的光子带隙结构及Bloch模式进行研究. 由于LiNbO₃晶体中的光折变机制主要是体光伏效应, 因此(2)式中 $E < 0$. 模拟计算采用的具体参数如下: 光波长 $\lambda = 500$ nm, $n_e = 2.3$, $\gamma_{33} = 280$ pm/V, $E_0 = 200$ V/mm, 则 $k = 2.89 \times 10^7$ m⁻¹, $\alpha = 4.28 \times 10^3$ m⁻², 因此 x, z, E 的归一化常数分别为 $2.84 \mu\text{m}$, 0.233 mm, 200 V/mm. 选取 $E = -1$, $I_0 = 1$, $d = 8$, 对(4)式进行求解, 得到的结果如图1所示. 图1(a)给出了波导阵列的衍射关系曲线, 其中传播常数 β 被禁带(即光子带隙, 图中的阴影区域)分隔开, 由上到下的3条曲线分别对应于前三阶通带在第一Brillouin区内的分布. 最顶端的带隙是波导阵列的半无穷禁带, 由波导阵列的全内反射所决定, 称为全内反射带隙; 其他带隙则由Bragg反射产生, 称为Bragg反射带隙. 只有当本征值位于通带时, 其对应的模式才能在波导阵列中传输; 而当本征值位于带隙中时, 光波能量就会在传播过程中迅速衰减. 图1(a)中第一阶通带所描述的衍射关系曲线近似为余弦型, 这与耦合模理论的计算结果相符^[2-5], 但高阶带和带隙的存在则无法用耦合模理论解释. 图1(b)给出了图1(a)中所示的前两阶通带中各点所对应的Bloch波模式在两个波导阵列周期内的复振幅分布. 从图1(b)中可以看出, 第一阶通带中的Bloch波的能量主要集中在折射率较高的区域, 其中Brillouin区边界上的点(M_1)对应的Bloch波的周期是波导阵列周期的两倍, 并且伴随着相位差为 π 的相位跃变; 第

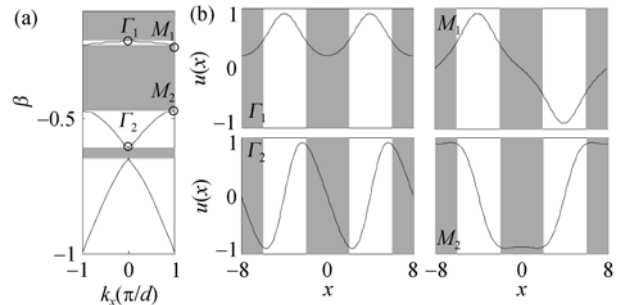


图1 光诱导平面波导阵列中的带隙结构和 Bloch 波
(a) 带隙结构, 其中阴影填充区域表示带隙; (b) 分别为(a)中各点对应的 Bloch 波, 阴影填充区域表示波导阵列低折射率区

二阶通带中 Bloch 波的能量主要集中在折射率较低的区域, Brillouin 区边界上的点(M_2)所对应 Bloch 波的周期也为波导阵列周期的两倍,同时也伴随着相位差为 π 的相位跃变.

值得注意的是,与光子晶体中反映色散的光子带隙不同,波导阵列中空间频率的光子带隙所反映的是光波在其中的衍射规律.图 2(a)给出了与图 1 对应第一和第二 Brillouin 区内前两阶通带的衍射关系曲线,其中箭头表示 $\beta-k_x$ 曲线的法线方向,该方向能大致反映出光束在不同 k_x 时的出射方向.由曲线可以看出光束的最大出射角度,对应于曲线斜率最大的位置(白色箭头处).图 2(b)对应 Gauss 光束以不同角度入射波导阵列时(k_x 不同)的出射位置.不难看出, Gauss 光束在第一 Brillouin 区内主要表现出图 2(a)中第一阶通带的衍射特性,而在第二 Brillouin 区时,主

要呈现出第二阶通带的衍射特性,即在第一 Brillouin 边界处,由于 Bragg 反射的影响, Gauss 光束所激发出的光波模式从第一阶通带转移到第二阶通带.图中白色虚线处的出射情形对应图 2(a)中虚线位置的衍射特性,也就是说在第一 Brillouin 区边界处的出射位置与正入射时的相同,而在图中各阶通带的最大出射角度与图 2(a)中白色箭头的位置相对应.图 2(c)~(e)分别对应图 2(b)中 $k_x=0, \pi/2d, \pi/d$ 时 Gauss 光束的传输情形,可以看出,随着入射角度逐渐增大,光束的传输行为从正常衍射(如图 2(c))逐渐过渡到反常衍射(如图 2(d)和(e)),中间经历无衍射状态(如图 2(d)).如果 k_x 从 π/d 继续增大,根据图 2(a)中第一阶通带的衍射特性,出射方向会偏向法线另一侧,形成负折射.但由图 2(b)可知,当 Gauss 光束入射角度超过 Bragg 角时,光束的衍射特性以第二阶通带的衍射特

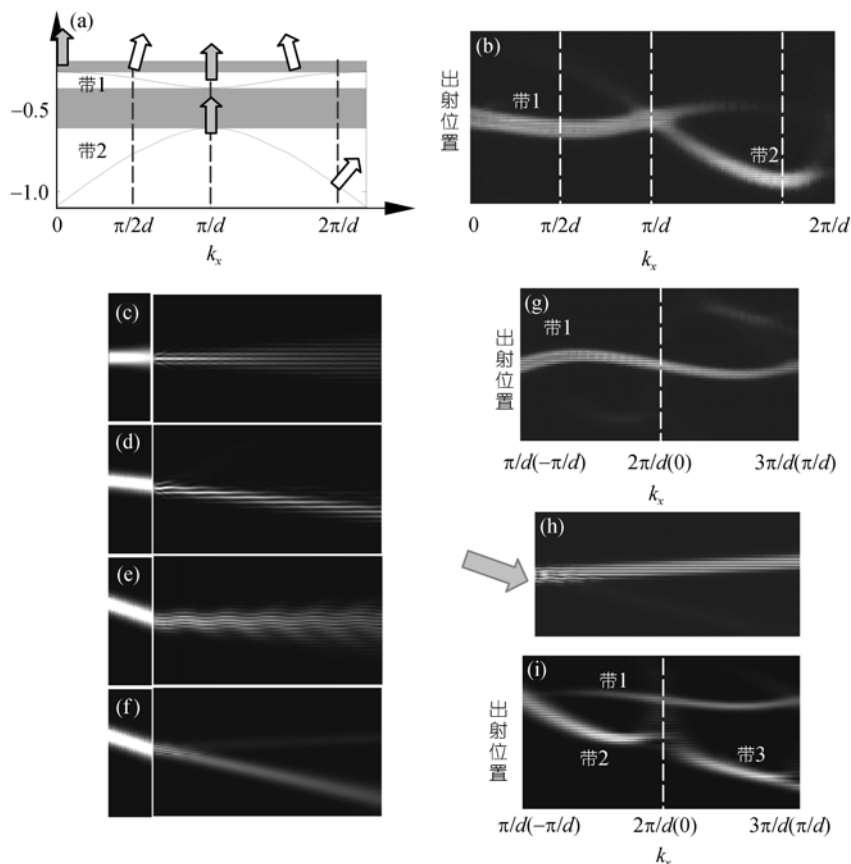


图 2 光子带隙与光波的衍射特性

(a) 光子带隙所反映的光波衍射示意图; (b) Gauss 光束在第一、二 Brillouin 区内的出射情形; (c)~(f) Gauss 光束分别在 $k_x=0, \pi/2d, \pi/d, 3\pi/2d$ 时的传输情形; (g) M_1 点处 Bloch 波在倾斜入射时的出射情形; (h) 对应(g)中 $k_x=3\pi/2d$ 时形成的负折射; (i) M_2 点处 Bloch 波在倾斜入射时的出射情形

性为主, 因而导致形成负折射的光波能量很弱(如图 2(f)). 若以图 1 中 M_1 点的 Bloch 模式(具有 Gauss 包络曲线)作为初始入射光束(此时入射光场相当于两束沿 Bragg 角方向入射的 Gauss 光束干涉场^[8]), 则在入射角倾斜的过程中, 传播常数 k_x 将以 π/d 和 $-\pi/d$ 为起始点逐渐增大, 所得到的光束出射位置如图 2(g)所示. 在 k_x 位于 π/d ($-\pi/d$) 和 $2\pi/d$ (0) 之间时, 此时光波的传输行为可认为是负折射效应. 图 2(h) 为选取图 2(g) 中 $k_x=3\pi/2d$ 时光波的传输情形, 此时将产生非常明显的负折射现象. 若以 M_2 点的 Bloch 模式(具有 Gauss 包络曲线)作为初始入射光束(此时入射光场相当于两束沿 Bragg 角方向入射的 Gauss 光束干涉场非格点入射的情形^[8]), 在不同入射角度时光束出射位置如图 2(i)所示. 它与图 2(g) 反映的都是同一倒格矢空间区域的光束出射情形, 只不过由于初始入射条件的不同, 光波所激发出的 Bloch 模式也不同. 从图 2(i) 中可以看出第一至三阶通带的衍射关系.

由以上分析可知, 要激发出不同阶次通带上的 Bloch 波, 入射光束的初始条件非常关键. 实验中可以采用相位调制^[6]以及双光束干涉场入射^[8]等方法实现. 这里分别采用 Gauss 光束和两个 Gauss 光束的干涉场作为初始入射光场, 通过传输在光诱导平面波导阵列($d=3$) 中激发出如图 3 所示的 Bloch 模式(图中所示为归一化复振幅分布), 其中图 3(a) 对应 Gauss 光

束入射的情形, 图 3(b) 和 (c) 分别对应两束以 Bragg 角度入射的 Gauss 光束干涉场以格点入射和非格点入射的情形, 图 3(d) 则对应于两束以 2 倍 Bragg 角入射的 Gauss 光束干涉场的情形. 经比较可以看出, 图 3(a)~(d) 所激发的 Bloch 模式分别与图 1 中 Γ_1 , M_1 , M_2 和 Γ_2 点相对应, 因此, 在实验中可以选用不同的方式实现对不同阶次通带 Bloch 模式的激发.

3 结构参数对光子带隙和 Bloch 波的影响

光诱导平面波导阵列的折射率分布可由写入光的特征强度 I_0 和周期 d 来决定. 对于不同的写入光强 I_0 , 波导阵列的折射率调制度不同, 相应的光子带隙结构也将改变. 由于光折变晶体是饱和非线性介质, 因此当 I_0 增大到一定值时, 折射率变化 Δn 会达到饱和(如图 4(a)所示), 进一步增大 I_0 , 波导阵列的结构不再发生明显变化, 带隙结构会趋于稳定, 模拟结果如图 4(b)所示(图中对应的波导阵列周期 $d=15$, 阴影区域表示通带).

当 I_0 分别取 0.05, 8 和 10 时, 得到如图 5 所示的模拟结果, 其中图 5(a)~(c) 中左图对应于光子带隙结构, 右边 4 幅图分别给出了与通带中各点对应的 Bloch 波在两个波导阵列周期内的复振幅分布. 与图 4 对照可以看出, 当光强 I_0 较小时, 平面波导阵列的折射率调制度很小, 与均匀介质接近, 所以 Bragg 反射带隙

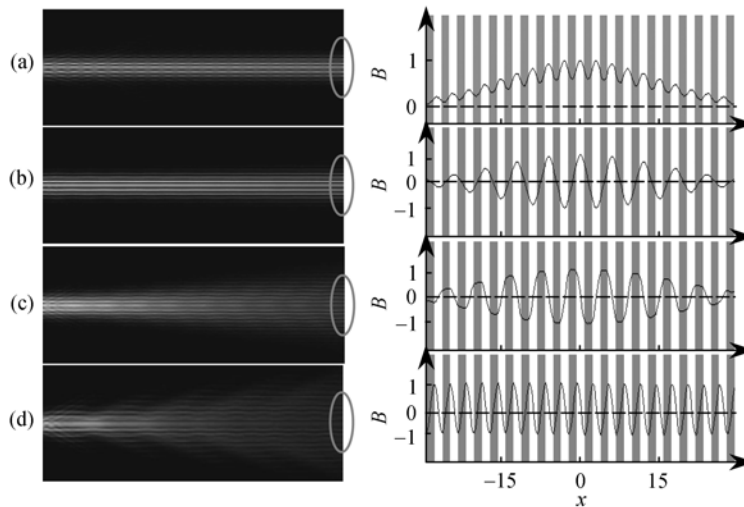


图 3 不同初始条件下所激发的 Bloch 波

(a) Gauss 光束正入射; (b) 两束以 Bragg 角度入射的 Gauss 光束干涉场格点入射; (c) 两束以 Bragg 角度入射的 Gauss 光束干涉场非格点入射; (d) 两束以 2 倍布拉格角入射的高斯光束干涉场入射; 其中阴影填充区域表示波导阵列低折射率区

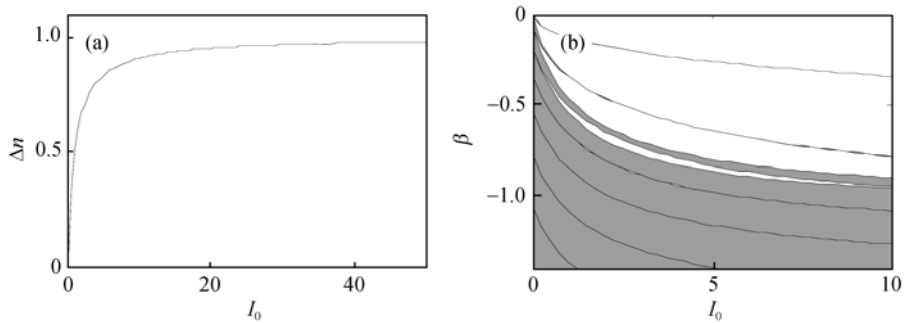


图 4 光强饱和效应及其对带隙结构的影响

(a) 光折变晶体对光强的饱和特性; (b) 波导阵列的带隙结构随写入光强的变化关系(其中阴影填充区表示通带)

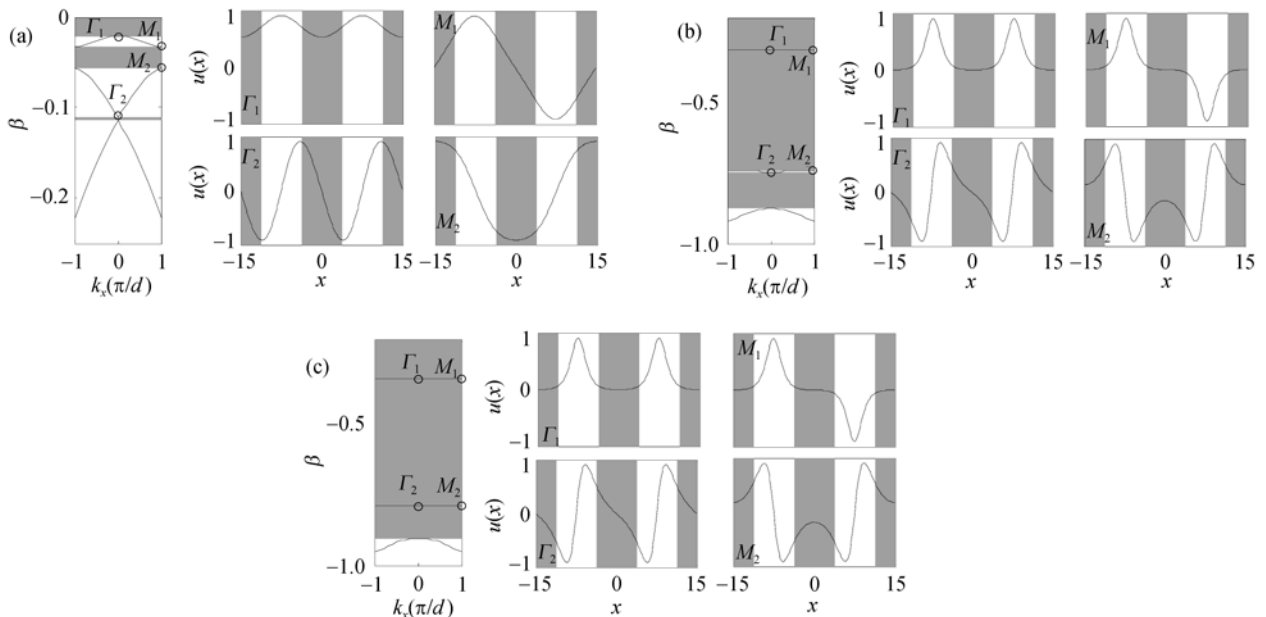


图 5 不同写入光强下平面波导阵列的带隙结构及 Bloch 波

(a) $I_0 = 0.05$; (b) $I_0 = 8$; (c) $I_0 = 10$

极窄. 随着 I_0 的增大, 波导阵列的折射率调制度也逐渐增大, 第一阶 Bragg 反射带隙也逐渐增宽, 而对于高阶 Bragg 反射带隙则先增宽后减小. 对于 Bloch 波而言, 随着写入光强的增大, 波导间的耦合减小, 能量逐渐向高折射率区转移; 当光强继续增大时, 折射率改变量趋于饱和, 波导阵列结构不再发生明显的变化, 因此带隙结构以及相应的 Bloch 波不再发生明显变化.

选取 $I_0 = 3$, 当平面波导阵列的周期 d 不同时, 计算得到的光子带隙结构如图 6 所示. 当 d 较小时, 各个通带的宽度随着 d 的增大而急剧下降, Bragg 反射

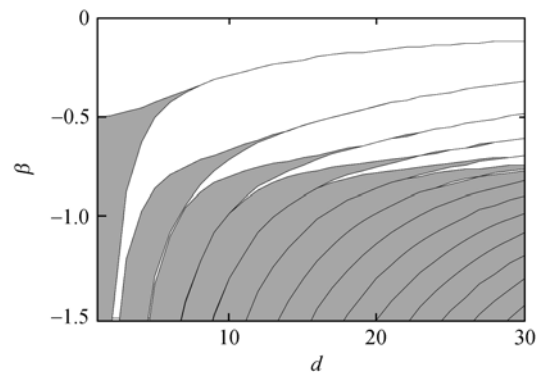


图 6 波导阵列的带隙结构随写入光周期的变化

带隙迅速增宽; 当 d 增大到一定值时, 带隙结构的变化趋于平缓. 此外, 当 d 很小时, 波导间的耦合很强, 对传播模式的限制较小, 所以带隙很小; 随着 d 的增大, 波导间耦合减弱, 带隙增大; 当 d 很大时, 波导间耦合极弱, 波导结构接近均匀介质, 带隙减小. 当周期 $d = 8, 10$ 和 15 时, 计算得到的空间频率模式的光子带隙以及 Bloch 波模式如图 7 所示, 其中左图和右边 4 幅图分别对应于光子带隙结构和 Bloch 波模式. 可以看出, 随着波导阵列周期的增大, 第一阶带中, 主要分布在高折射率区的 Bloch 波能量更集中, 使得分布曲线变得锐细, 而高阶带中, 低折射率区的能量迅速向高折射率区波导转移, 且光波能量更集中, 这与光子带隙和 Bloch 波随光强的变化情形大致相同, 只是周期引起带隙的变化更强烈.

从图 4~6 所示结果可以看出, 光诱导平面波导阵列的结构参数对光子带隙和 Bloch 波都具有显著的影响, 这必将导致波导阵列中光波的线性传输行为发生改变. 结合不同角度入射光波在波导阵列中的传输特性, 对波导阵列的结构参数的影响进行了研究. 图 8 为不同结构参数下, 以 M_2 点的 Bloch 模式(具有 Gauss 包络曲线)作为初始入射光束时, 出射位置随入射角度的变化情形. 与图 2(i)类似, 反映出了前三阶通带的衍射关系. 图 8 中上排对应阵列写入光强不同时

的情形, (a)~(c)分别对应 $I_0 = 0.1, 1, 10$, 写入光周期均为 $d = 3$. 由图 4(b)可以看出, 第二、三阶通带被第二 Bragg 反射带隙分隔开, 当光强很小时, 带隙极窄, 甚至没有带隙, 因此光波的 Bragg 反射很弱(如图 8(a)); 随着光强的增大, 带隙逐渐增宽, Bragg 反射增强, 从而导致在 Bragg 角度附近, 两阶通带分开(如图 8(b)~(c)). 保持阵列写入光强 $I_0 = 1$ 不变, 在阵列周期增大的过程中, 可以得出类似的结论, 如图 8 下排所示, 其中图 8(d)~(f)分别对应 $d = 2, 3, 4$ 的情形. 很明显, 随着周期的增大, 光子带隙迅速增宽, 第二、三阶通带在 Bragg 角度附近逐渐分离. 由图 8 同样可以看出, 相对阵列写入光强而言, 周期改变的影响更加强烈.

4 总结与展望

以光折变 LiNbO_3 晶体为模型, 通过数值模拟分析了光诱导平面波导阵列的空间频率模式的光子带隙结构、低阶带 Bloch 波以及其中的光波传输特性, 详细讨论了光子带隙与光波衍射的关系, 并分析了波导阵列的结构参数对光子带隙、Bloch 波以及光波线性传输行为的影响. 光波在波导阵列中的线性传输行为与其空间频率的光子带隙密切相关, 衍射关系曲线的斜率能大致反映光波衍射的方向角. 随着入射角的增大, Gauss 光束的传输会从离散衍射逐渐

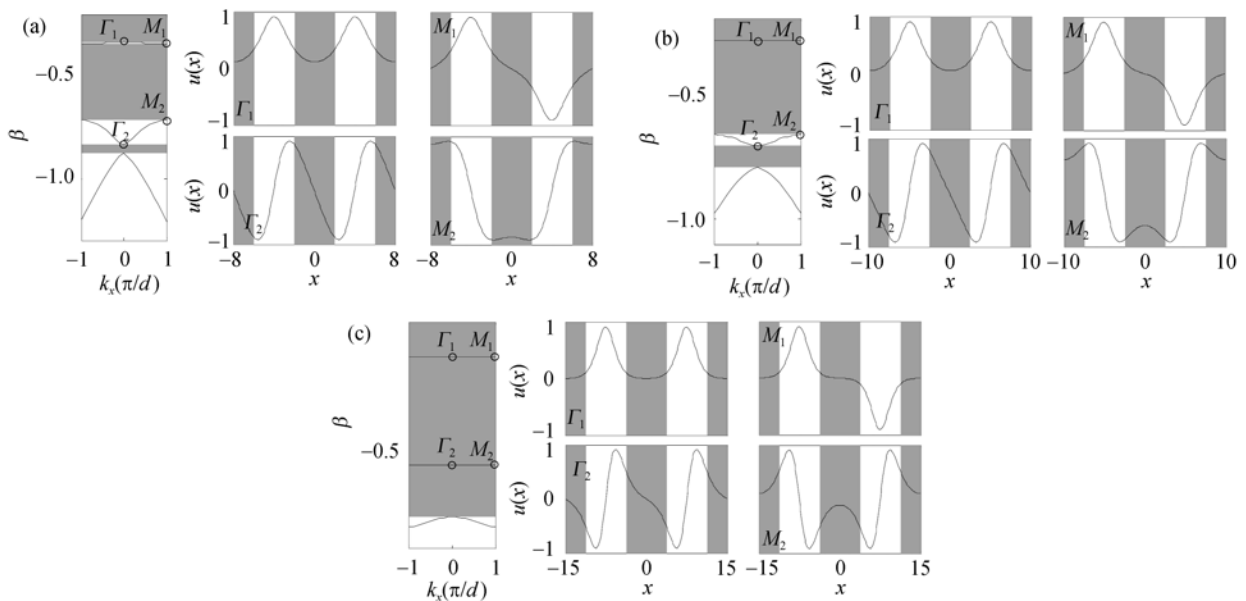


图 7 不同写入光周期下平面波导阵列的带隙结构及 Bloch 波

(a) $d = 8$; (b) $d = 10$; (c) $d = 15$

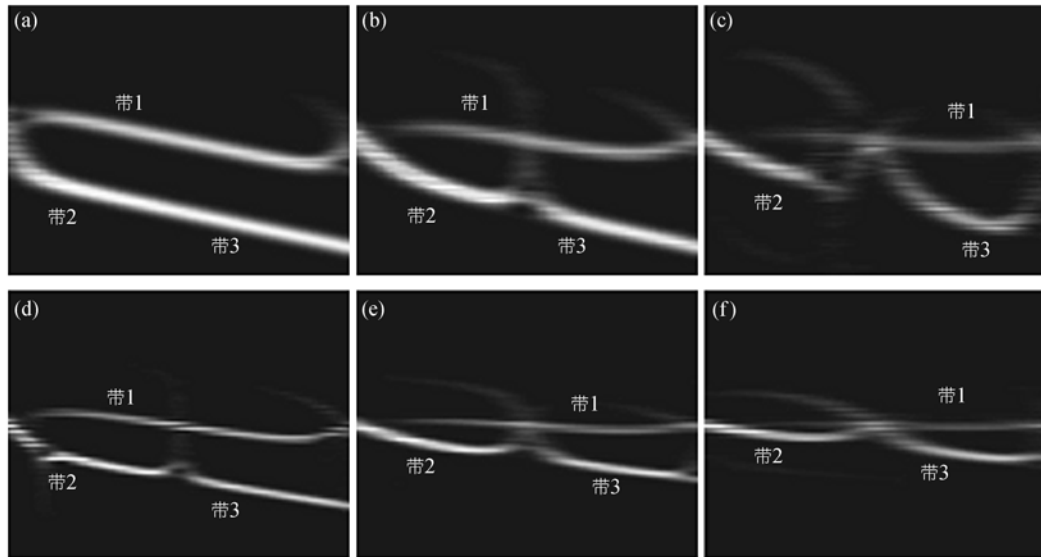


图 8 带隙宽度对光波衍射的影响

上排: 不同写入光强下的出射情形, 其中(a)~(c)分别对应 $I_0 = 0.1, 1, 10$; 下排: 不同写入光周期时的出射情形, 其中(d)~(f)分别对应 $d = 2, 3, 4$

演化为反常衍射, 其间经历无衍射光状态, 此时主要表现为第一阶通带的衍射特性; 当横向传播常数 k_x 位于第二 Brillouin 区时, 则主要呈现出第二阶通带的衍射特性. 采用 Bloch 模式(具有 Gauss 包络曲线)作为初始入射光束可得到各阶通带的衍射情形, 并可能出现负折射现象. 此外, 通过改变入射初始条件可以激发出各通带上的 Bloch 波. 当波导阵列的折射率调制度和周期改变时, 光子带隙与 Bloch 模式在不同波导阵列的折射率调制度下, 光子带隙会随着折射率调制度的增大而变宽. 同时, 由于饱和效应的存在, 当写入光强位于饱和区时, 平面波导阵列的调制度

基本不变, 此时光子带隙的结构随写入光强的变化逐渐趋于平稳, Bloch 波也基本保持不变; 波导阵列周期不同时, 光子带隙随着周期的增大先增大而后减小, Bloch 波能量逐渐向高折射率区集中. 随着光子带隙的打开和增宽, 相邻通带的传输模式会随着入射角的变化在 Bragg 角度附近发生分离和突变, 这些结果有助于理解平面波导阵列中光波的离散传输特性, 同时可以为在 LiNbO_3 等光折变晶体中开展的相关实验研究提供理论参考. 另外, 进一步采用非线性传输模型可以针对光诱导平面波导阵列中的离散孤子和带隙孤子进行研究.

参考文献

- 1 Christodoulides D N, Lederer F, Silberberg Y. Discretizing light behaviour in linear and nonlinear waveguide lattices. *Nature*, 2003, 424: 817—823 [\[DOI\]](#)
- 2 Eisenberg H S, Silberberg Y S. Diffraction management. *Phys Rev Lett*, 2000, 85(9): 1863—1866 [\[DOI\]](#)
- 3 Morandotti R, Eisenberg H S, Silberberg Y, et al. Self-focusing and defocusing in waveguide arrays. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(15): 3296—3289 [\[DOI\]](#)
- 4 Pertsch T, Zentgraf T, Peschel U, et al. Anomalous refraction and diffraction in discrete optical systems. *Phys Rev Lett*, 2002, 88(9): 093901 [\[DOI\]](#)
- 5 Eisenberg H S, Silberberg Y, Morandotti R, et al. Discrete spatial optical solitons in waveguide arrays. *Phys Rev Lett*, 1998, 81(16): 3383—3386 [\[DOI\]](#)
- 6 Träger D, Fischer R, Neshev D N, et al. Nonlinear Bloch modes in two-dimensional photonic lattices. *Opt Express*, 2006, 14(5): 1913—1923 [\[DOI\]](#)

- 7 Shi Z Q, Yang J K. Solitary waves bifurcated from Bloch-band edges in two-dimensional periodic media. *Phys Rev E*, 2007, 75(5): 056602 [\[DOI\]](#)
- 8 Rosberg C R, Neshev D N, Sukhorukov A A, et al. Tunable positive and negative refraction in optically induced photonic lattices. *Opt Lett*, 2005, 30(17): 2293—2295 [\[DOI\]](#)
- 9 Christodoulides D N, Joseph R I. Discrete self-focusing in nonlinear arrays of coupled waveguides. *Opt Lett*, 1988, 13(9): 794—796 [\[DOI\]](#)
- 10 Eisenberg H S, Silberberg Y, Morandotti R, et al. Observation of discrete solitons in optical waveguide arrays. *Phys Rev Lett*, 1998, 81(16): 3383—3386 [\[DOI\]](#)
- 11 Neshev D, Ostrovskaya E, Kivshar Y, et al. Spatial solitons in optically induced gratings. *Opt Lett*, 2003, 28(9): 710—712 [\[DOI\]](#)
- 12 Martin H, Eugenieva E D, Chen Z G, et al. Discrete solitons and soliton-induced dislocations in partially coherent photonic lattices. *Phys Rev Lett*, 2004, 92(12): 123902 [\[DOI\]](#)
- 13 He Y J, Chen W H, Wang H Z, et al. Surface superlattice gap solitons. *Opt Lett*, 2007, 32(11): 1390—1392 [\[DOI\]](#)
- 14 Chen W H, He Y J, Wang H Z, et al. Defect superlattice solitons. *Opt Express*, 2007, 15(22): 14498—14503 [\[DOI\]](#)
- 15 Chen W H, He Y J, Wang H Z. Surface defect superlattice solitons. *J Opt Soc Am B*, 2007, 24(10): 2584—2588 [\[DOI\]](#)
- 16 Lou C B, Wang X S, Xu J J, et al. Nonlinear spectrum reshaping and gap-soliton-train trapping in optically induced photonic structures. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 213903 [\[DOI\]](#)
- 17 Wang X S, Bezryadina A, Chen Z G, et al. Observation of two-dimensional surface solitons. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 123903 [\[DOI\]](#)
- 18 Xiao F J, Zhang P, Liu S, et al. Interactions of discrete-soliton trains in two-dimensional light-induced photonic lattices. *Chin Phys Lett*, 2007, 24(12): 3435—3438 [\[DOI\]](#)
- 19 Zhang P, Zhao J L, Xiao F J, et al. Elliptical discrete solitons supported by enhanced photorefractive anisotropy. *Opt Express*, 2008, 16(6): 3865—3870 [\[DOI\]](#)
- 20 Zhang P, Liu S, Zhao J L, et al. Optically induced transition between discrete and gap solitons in a nonconventionally biased photorefractive crystal. *Opt Lett*, 2008, 33(7): 878—880 [\[DOI\]](#)
- 21 肖发俊, 张鹏, 刘圣, 等. 光诱导平面波导阵列中离散空间光孤子的相干相互作用. *物理学报*, 2008, 57(4): 2529—2535
- 22 Mandelik D, Morandotti R, Aitchison J S, et al. Gap solitons in waveguide arrays. *Phys Rev Lett*, 2004, 92(9): 093904 [\[DOI\]](#)
- 23 Efremidis N K, Hudock J, Christodoulides D N, et al. Two-dimensional optical lattice solitons. *Phys Rev Lett*, 2003, 91(21): 213906 [\[DOI\]](#)
- 24 Fischer R, Träger D, Neshev D N, et al. Reduced-symmetry two-dimensional solitons in photonic lattices. *Phys Rev Lett*, 2006, 96(2): 023905 [\[DOI\]](#)
- 25 Matuszewski M, Rosberg C R, Neshev D N, et al. Crossover from self-defocusing to discrete trapping in nonlinear waveguide arrays. *Opt Express*, 2006, 14(1): 254—259 [\[DOI\]](#)
- 26 陈志刚, 许京军, 楼慈波. 光诱导光子晶格结构中新型的离散空间光孤子. *物理*, 2005, 34(1): 12—17
- 27 Fleischer J W, Segev M, Efremidis N K, et al. Observation of two-dimensional discrete solitons in optically-induced nonlinear photonic lattices. *Nature*, 2003, 422: 147—150 [\[DOI\]](#)
- 28 Chen Z G, Martin H, Eugenieva E D, et al. Formation of discrete solitons in light-induced photonic lattices. *Opt Express*, 2005, 13(6): 1816—1826 [\[DOI\]](#)
- 29 Cohen O, Bartal G, Buljan H, et al. Observation of random-phase lattice solitons. *Nature*, 2005, 433: 500—503 [\[DOI\]](#)
- 30 Bartal G, Cohen O, Manela O, et al. Observation of random-phase gap solitons in photonic lattices. *Opt Lett*, 2006, 31(4): 483—485 [\[DOI\]](#)
- 31 Pezer R, Buljan H, Fleischer J W, et al. Gap random-phase lattice solitons. *Opt Express*, 2005, 13(13): 5013—5023 [\[DOI\]](#)
- 32 赵建林, 李碧丽, 张鹏, 等. 用光辐照法在 SBN:Cr 晶体中写入动态阵列平面光波导. *物理学报*, 2004, 53(8): 2583—2588
- 33 Zhang P, Yang D X, Zhao J L, et al. Light-induced array of three-dimensional waveguides in Lithium Niobate by employing two-beam interference field. *Chin Phys Lett*, 2004, 21(8): 1558—1561 [\[DOI\]](#)
- 34 Chen Z G, McCarthy K. Spatial soliton pixels from partially coherent light. *Opt Lett*, 2002, 27(22): 2019—2021 [\[DOI\]](#)
- 35 Buse K, Breer S, Peithmann K, et al. Origin of thermal fixing in photorefractive lithium niobate crystals. *Phys Rev B*, 1997, 56(3): 1225—1235 [\[DOI\]](#)
- 36 Eggert H A, Hecking B, Buse K. Electrical fixing in near-stoichiometric lithium niobate crystals. *Opt Lett*, 2004, 29(21): 2476—2478 [\[DOI\]](#)
- 37 Yeh P, Yariv A, Hong C S. Electromagnetic propagation in periodic stratified media. *J Opt Soc Am*, 1977, 67(4): 423—438 [\[DOI\]](#)
- 38 Zozulya A A, Anderson D Z. Propagation of an optical beam in a photorefractive medium in the presence of a photogalvanic nonlinearity or an externally applied electric field. *Phys Rev A*, 1995, 51(2): 1520—1531 [\[DOI\]](#)