

基于Bragg反射面结构的衍射光栅设计与研究

李宝 朱京平[†] 杜炳政

(西安交通大学电子物理与器件教育部重点实验室, 陕西省信息光子技术重点实验室, 西安 710049)

(2014年3月9日收到; 2014年5月15日收到修改稿)

基于Bragg反射光栅是一维光子晶体的一种特例结构, 本文提出利用一维光子晶体带隙理论进行Bragg反射光栅设计. 通过光学仿真软件OptiFDTD对Bragg反射光栅的宽度及倾斜角度误差的仿真分析, 发现Bragg光栅齿刻槽宽度变化在10%范围、倾斜角度 10° 以内不会引起Bragg光栅衍射效率的明显变化, 说明Bragg反射光栅具有较高的工艺误差容忍; 根据一维光子晶体带隙理论, 设计了一种罗兰圆结构的Bragg衍射双光栅结构模型, 实现了两个频段之间的衍射分光, 优化分析结果表明: 当第一套光栅中Bragg周期层数为6、第二套光栅Bragg周期层数为10时, 两频段波长的衍射效率均可以达到70%左右, 明显高于传统深刻蚀的衍射光栅. 基于本设计的波分复用器是一种尺寸小、衍射效率高的新型EDG波分复用器, 为未来高效密集型EDG波分复用器发展提供了一种新的设计思路.

关键词: 1-D光子晶体, Bragg蚀刻衍射光栅, 衍射效率, 罗兰圆双光栅

PACS: 42.79.Dj, 42.40.Lx

DOI: 10.7498/aps.63.194209

1 引言

近些年全球互联网流量增速近40%, 光通信容量的增速已从超摩尔定律的78%降到现在的20%, 到2020年将现容量危机. 波分复用技术由于可在一根光纤上同时传输几十乃至上千个光波信号, 成为光纤系统传输容量增加的主力. 波分复用器是波分复用系统里最关键、最核心的部件, 其中基于平面波导集成技术设计制作的蚀刻衍射光栅 (etched diffraction grating, EDG) 器件, 由于具有结构紧凑、光谱性能优异等优势, 成为其中最具有广泛应用潜力的一种. 然而, EDG器件多采用深刻蚀衍射光栅, 工艺相对复杂, 稍有加工工艺误差就会严重影响器件性能, 换言之, 光栅性能直接影响到EDG器件性能, 这也是这种器件至今还在研究阶段而未商用的原因之一. 因此, 对EDG器件中蚀刻衍射光栅的研究是诸多学者所关注的重点.

为改进蚀刻衍射光栅型器件的设计, 提高器件的光学性能, 国内外学者主要在降低插入损耗、减

小通道串扰及偏振敏感性等方面进行了深入的研究. 1998年, He等^[1]深入分析了EDG的光栅齿面特性, 发现刻蚀光栅的齿面平滑度、刻蚀深度与光栅角的垂直度是影响EDG散射损耗的主要因素. 2004年 Song等^[2]研究发现光栅齿的刻蚀顶角与底角误差会影响器件的插入损耗; 为了降低菲涅尔反射损耗, 提高器件衍射效率, 1997年 Erickson等^[3]提出了全内反射型光栅齿面结构, 通过改变反射面结构降低菲涅尔反射损耗, 实现了中心波长1550 nm附近59.6%左右的衍射效率; 2002年, Sadv和McGreer^[4]研究了全内反射型光栅齿结构的偏振相关性.

除了改变齿面结构以提高衍射效率外, 在光栅齿表面镀金属膜是提高衍射效率的另一种有效方法, 然而这种方法无法避免因入射光的一部分能量被金属材料吸收而导致的能量损耗. 最终学者们将目光聚焦在了光栅齿面具有反射功能、且在相应带宽内衍射效率较高的Bragg光栅结构上. 2008年, Brouckaert等^[5]用Bragg反射光栅^[6]代替深刻蚀光栅制成了1550 nm波段、尺寸为 $280\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$

[†] 通讯作者. E-mail: jpzhu@mail.xjtu.edu.cn

的波分复用器, 器件损耗为1.9 dB; 2012年Jafari等^[6]对Bragg反射光栅型波分复用器理论研究结果表明: Bragg反射光栅型结构可有效降低器件插入损耗、提高EDG型波分复用器的衍射效率. 目前, 对Bragg反射光栅型波分复用器的设计主要是利用多层介质膜理论确定Bragg反射光栅的禁带, 从而设计波分复用器的工作频带, 这种方法确定的Bragg反射光栅禁带不够准确, 尤其是在非垂直入射情况下, 频带漂移较严重; 另一方面, 设计过程只是利用了Bragg反射光栅的禁带特性而未利用其导带特性, 导致器件的设计主要集中在单一频段, 没有实现双频段或多频段分光的功能.

由于Bragg反射光栅在结构理论上是1-D光子晶体的一种特例, 本文利用1-D光子晶体的带隙理论指导Bragg反射光栅设计, 研究了Bragg反射光栅厚度和倾斜角度误差对光栅衍射效率造成的影响; 同时利用1-D光子晶体的带隙理论, 设计了罗兰圆Bragg衍射双光栅结构, 实现了双频段宽带高效衍射, 并通过模拟仿真证实了理论分析的正确性. 该种Bragg衍射双光栅结构是一种尺寸小、衍射效率高的新型EDG分光结构, 将为未来密集型蚀刻衍射光栅的发展提供一种新的设计思路, 在光通讯^[7]、光谱仪设计和集成光学领域具有重要应用潜力.

2 Bragg光栅齿面设计及误差分析

本文使用布拉格反射光栅(Bragg reflection grating, BRG)^[8]代替传统深刻蚀衍射光栅齿. 每个凹面光栅齿由一个多周期BRG光栅构成, 结构

如图1所示.

为实现衍射光栅功能, 入射光必须同时满足光栅方程和Bragg方程, Bragg光栅多层介质膜的衍射原理图如图2所示.

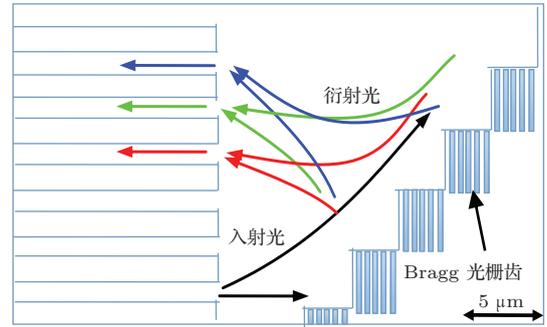


图1 BRG衍射光栅结构示意图

在折射率为 n_1 的平面波导中刻蚀填充折射率为 n_2 的多层介质膜. 衍射光栅周期为 a , Bragg光栅周期为 d , 光栅齿的闪耀角为 θ , 在Bragg光栅中折射率 n_1 材料厚度为 d_1 , 折射率 n_2 材料厚度为 d_2 ($d = d_1 + d_2$).

多层介质膜Bragg衍射光栅需同时满足

$$M\lambda = na(\sin \alpha + \sin \beta), \quad (1)$$

$$m\lambda = 2 \left[n_1 d_1 \cos \phi_1 + n_2 d_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \phi_1} \right], \quad (2)$$

其中 α 为入射角, β 为衍射角, M 为光栅衍射级次, λ 为入射波长, n 为折射率, m 为Bragg衍射级数,

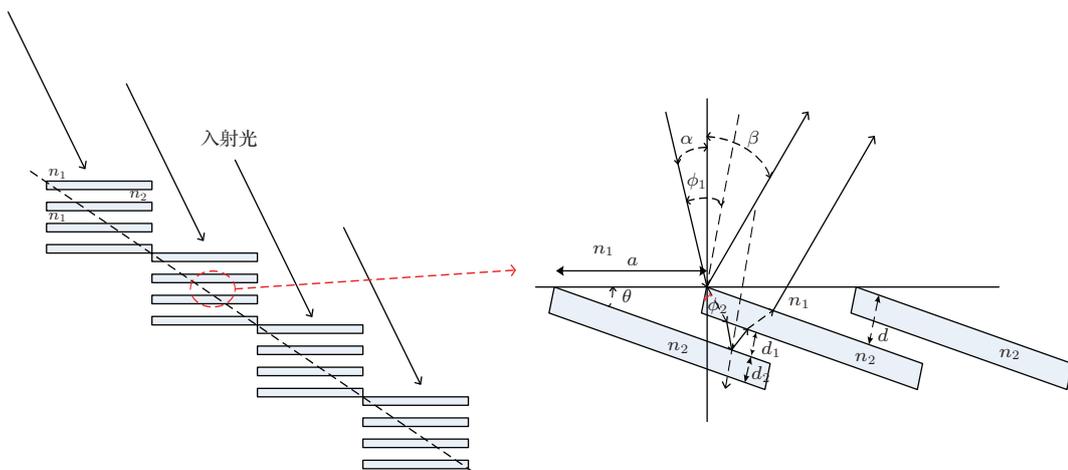


图2 Bragg光栅衍射原理图

ϕ_1 为折射率 n_1 介质中的入射角, ϕ_2 为折射率 n_2 介质中的折射角. 由几何关系

$$\sin \theta = \frac{d}{a}, \quad \alpha - \phi_1 + \theta = 0, \quad \alpha - \beta = 2\phi_1,$$

可以得到 Bragg 周期 d 与光栅周期 a 之间的关系为

$$d = -a \sin \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right). \quad (3)$$

选定光栅的结构参数 $(n_1, n_2, M, \alpha, \lambda, \beta)$, 就可以通过上述公式关系得到其他的设计参数 a, θ, ϕ_1, d . 此外, 为了实现 Bragg 光栅的最大衍射效率, Bragg 光栅中介质膜的厚度需要满足

$$d_1 = \frac{(2k_1 + 1)\lambda}{4n_1 \cos \phi_1}, \quad (4)$$

$$d_2 = \frac{(2k_2 + 1)\lambda}{4n_2 \cos \phi_2}, \quad (5)$$

其中 k_1, k_2 均为整数. 确定出 Bragg 光栅中介质膜的厚度 d_1, d_2 后, 根据一维光子晶体的带隙理论^[9,10], 利用布洛赫定理, 进行傅里叶级数展开, 即可得到 TE/TM 模式的本征方程, 从而给出不同波矢 K 对应的归一化频率 $\omega a / (2\pi c)$; 继而利用传输矩阵方法^[11,12], 可计算 Bragg 反射光栅的全方位反射带和光子带隙. 通过对归一化频率的化简^[9,10], 得到对应的波长带宽.

2.1 光栅刻槽宽度偏差对 Bragg 光栅衍射效率影响

为研究 BRG 光栅齿面的光学性能, 本文选择光通信波长 1550 nm 附近的波段范围, 仿真分析 Bragg 反射光栅齿面进行二维宽度误差和三维倾斜角度误差.

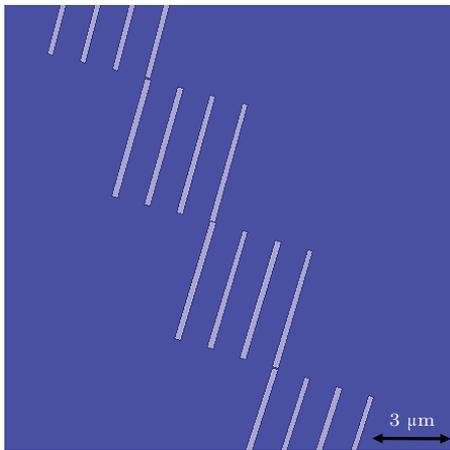


图3 OptiFDTD 中 DBR 型光栅齿面结构

Bragg 光栅周期为 1.154 μm , 光栅闪耀角为 30° , 入射角度 15° . 在 SiO_2 平板波导上刻蚀空气 Bragg 光栅, 其中 SiO_2 介质层厚度 $d_{\text{SiO}_2} = 0.8756 \mu\text{m}$, 空气层厚度 $d_{\text{air}} = 0.2789 \mu\text{m}$. 根据一维光子晶体的带隙理论, 利用传输矩阵法进行计算, 可以得到在上述参数下入射光 TE/TM 模式对应的 Bragg 光栅能带图, 如图 4, 其中黑色部分表示入射光锥内的全方位反射禁带, 红色和蓝色部分分别对应 TE/TM 模式下 Bragg 光栅的导带. 根据归一化频率计算得该 Bragg 光栅的禁带为 1470.1—1629.9 nm. 选取禁带中心波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 附近 60 nm 的带宽 1520—1580 nm 作为入射波段, 波长间隔为 10 nm.

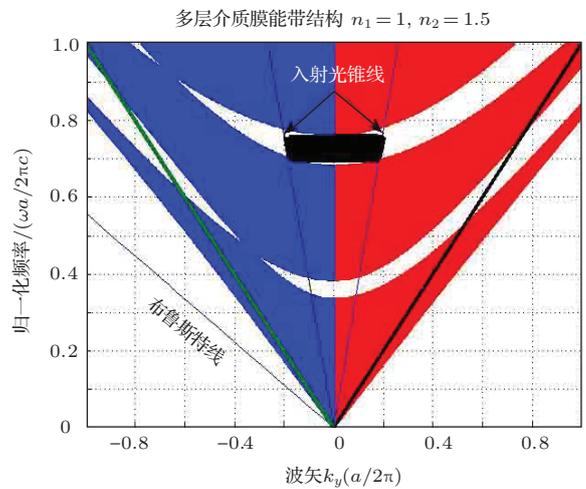


图4 Bragg 光栅能带图

图 3 为利用 OptiFDTD 软件建立的 BRG 型光栅齿面结构. 实际加工中, Bragg 光栅齿刻蚀空气层厚度会产生一定程度的误差, 导致空气层厚度的增加或减小, 根据 1-D 光子晶体理论, 空气层厚度的变化会引起入射波长衍射效率的改变. 设加工导致的厚度变化范围为 $d_{\text{air}} \pm (d_{\text{air}} \times \Delta\%)$, DBR 光栅衍射效率^[13-15] 随空气层厚度误差 $\Delta\%$ 变化的仿真结果如图 5 所示.

由仿真结果可知, 在 Bragg 光栅周期不变的情况下, 刻蚀空气层厚度的改变会造成衍射效率峰值波长的微小漂移, 但无论空气层厚度增加(图 5(b))还是减小(图 5(a)), 在刻蚀宽度误差 10% 范围内, 入射波段衍射效率的变化范围均在 3% 以内, 没有引起频带范围内波长衍射效率的明显变化.

改变空气层厚度 d_{air} 利用传输矩阵法计算得 Bragg 光栅在 1200—1900 nm 波长范围内的反射效

率如图 6 所示。

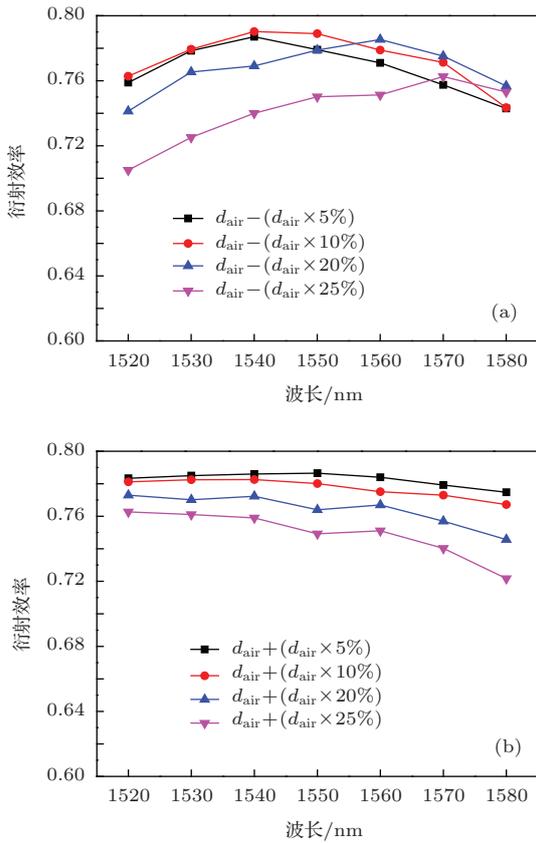


图 5 衍射效率随 Bragg 光栅刻槽宽度误差的变化 (a) 刻槽宽度误差 $d_{\text{air}} - (d_{\text{air}} \times \Delta\%)$; (b) 刻槽宽度误差 $d_{\text{air}} + (d_{\text{air}} \times \Delta\%)$

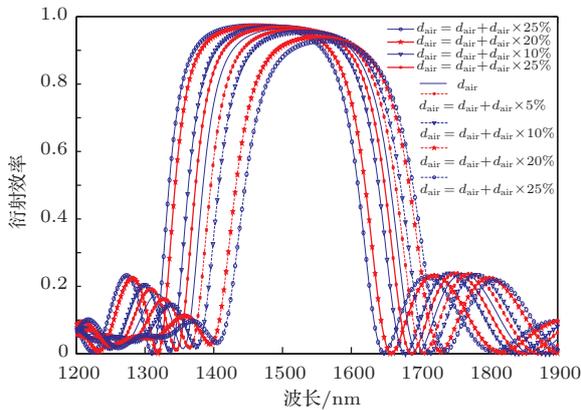


图 6 传输矩阵法计算的 Bragg 光栅反射效率

可见, 空气层厚度的增加/减小会使光子晶体带宽向短/长波长漂移, 但空气层厚度误差在 $\pm 10\%$ 范围内时, 中心波长 1550 nm 附近 60 nm 带宽内的反射效率变化不大. 用传输矩阵法数值计算场能量的反射效率进一步印证了仿真结果的有效性, 说明仿真结果所表现的反射效率偏差是由于一小部

分能量在 Bragg 光栅上衍射到其他级次所导致的. 因此 Bragg 型蚀刻衍射光栅具有较好的宽度误差容忍.

2.2 光栅刻槽垂直度对 Bragg 光栅衍射效率影响

考虑对称平板波导的模型结构, 芯层平板波导为 SiO_2 (折射率 $n = 1.5$), 衬底层和覆盖层均为空气, 入射波长为 1520—1580 nm, 波长间隔 10 nm, 建立三维结构 Bragg 反射光栅, 其齿面非垂直度的范围为 $0^\circ - 10^\circ$, 利用 OptiFDTD 进行三维仿真, 并对近场的傅里叶变换可以得到光栅衍射的远场光强分布如图 7 所示. 可见, 衍射光的能量虽然主要集中在一个闪耀级次上, 但其他级次上也有能量分布. 入射波长衍射效率随 Bragg 光栅非垂直度的变化趋势如图 8.

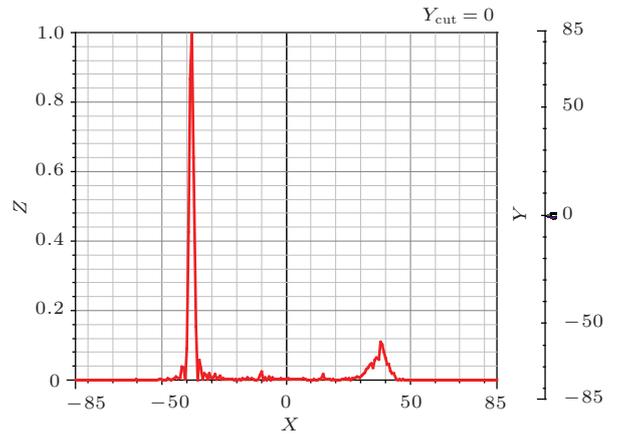


图 7 Bragg 光栅衍射远场光强分布

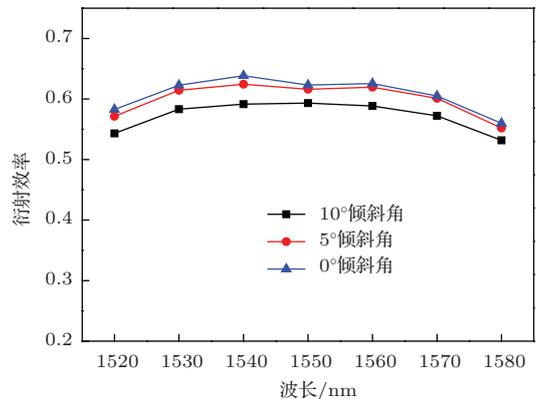


图 8 入射光衍射效率随 BRG 非垂直度的变化

可见, 随着刻蚀 Bragg 光栅齿非垂直角度的增加, 入射光波衍射效率整体呈下降趋势, 其中中心

波长附近下降了5.1%，其他入射波长处平均下降约6%，说明对于浅刻蚀Bragg反射光栅，即使光栅齿面垂直度不够好，所引起的光能量损耗也非常有限，究其原因可能为：1) 相比于传统深刻蚀光栅，Bragg刻蚀光栅只需要浅刻蚀，避免了传统光栅因为深刻蚀加工导致的刻槽底与槽顶之间的过大偏差；2) 一般情况下由4—8层的Bragg光栅齿面代替一个传统的光栅反射齿面，其空气膜层远小于传统刻蚀光栅齿面，刻蚀不均一性导致的厚度误差也就可控制在更小的范围内，造成的Bragg光栅倾斜角变化引起光栅衍射效率的变化相应减小，说明Bragg反射光栅具有很好的非垂直度误差容限。

3 Bragg衍射双光栅

由于Bragg反射光栅具有较高的制作工艺容限，且可替代镀金属刻蚀面提高器件衍射效率，因此，结合一维光子晶体的带隙理论，选择合适的高低折射率材料以及厚度比，可以设计对某一频段光波有较高的反射率，而对另一频段的光波有较高透射率的Bragg反射光栅，从而构造出浅刻蚀Bragg衍射双光栅模型。

针对不同的光波频段分别采用不同的凹面反射光栅，由于两套光栅相互独立，因此可以自由选取入射角、衍射角、衍射级和光栅周期等参数，实现同一平面集成波导器件上的多频段衍射分光。衍射双光栅结构示意图如9所示，其每一个光栅都为罗兰圆^[16]结构，第一套凹面衍射光栅G₁齿面采用BRG，通过适当的参数选取，可使其对某一频段的光波具有很高的反射率，而对另一频段的光波具有很高的透射率；使透过的光波在第二套凹面光栅G₂具有很高的反射率，将其衍射到其他的方向。G₂可使用普通的全内反射型或BRG型齿面结构，为提高光波衍射效率，我们同样选择BRG结构，在SiO₂基板上刻蚀空气。图10为OptiFDTD建立的罗兰圆Bragg双光栅模型，红色线条为输入光源，圆弧为对应的罗兰圆和光栅圆。G₁和G₂输入波导

相同，而不同的频段需要衍射到不同的方向，因而输出波导位置不同。该结构不需要进行二次曝光和刻蚀，所有结构均可一次完成，因而更加简单高效。

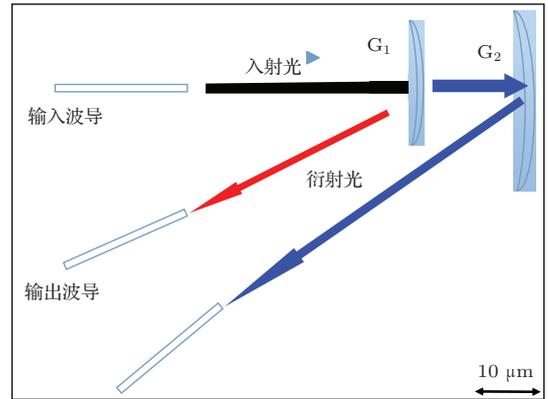


图9 双光栅设计示意图

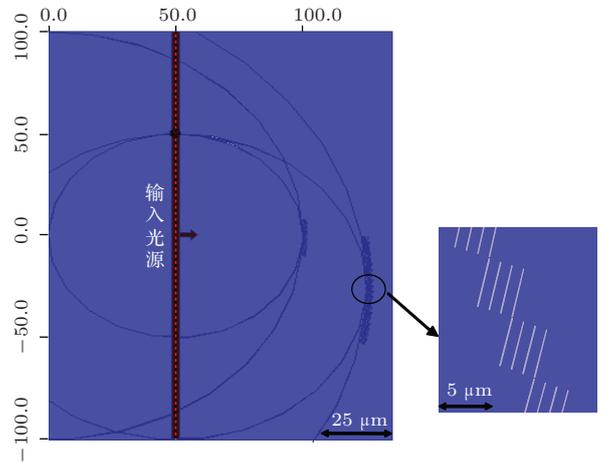


图10 OptiFDTD中Bragg双光栅2-D模型

选择两光栅的结构参数如表1，建立OptiFDTD仿真模型。鉴于计算机内存限制并缩短计算时间，双光栅EDG的入射光波段选择短波段；G₁、G₂光子晶体TE模式禁带宽度分别为591.9—671.8 nm，780.1—879.9 nm。

图11为用Matlab绘制的凹面光栅G₁和G₂的Bragg光栅能带图，黑色线条部分表示1-D光子晶体的全方向反射禁带。

表1 罗兰圆双光栅器件结构参数

光栅	光栅周期/ μm	Bragg周期/ μm	闪耀角/ $^\circ$	入射角/ $^\circ$	光栅圆R/ μm	罗兰圆r/ μm	d_{air} / μm	d_{SiO_2} / μm
G ₁	0.9191	0.4505	30	45	100	50	0.1110	0.3485
G ₂	2.3660	0.6124	15	45	150	75	0.1479	0.4645

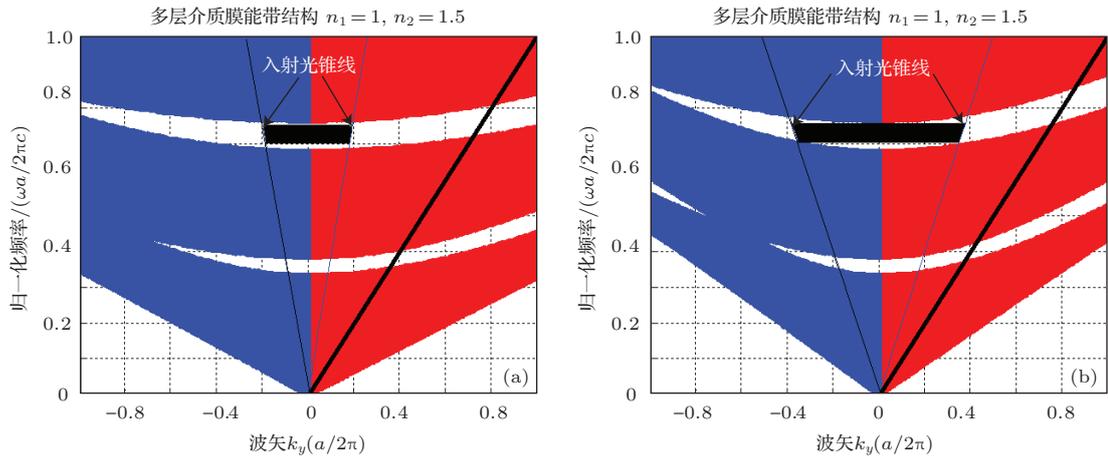


图 11 Bragg 光栅结构能带图 (a) G₁; (b) G₂

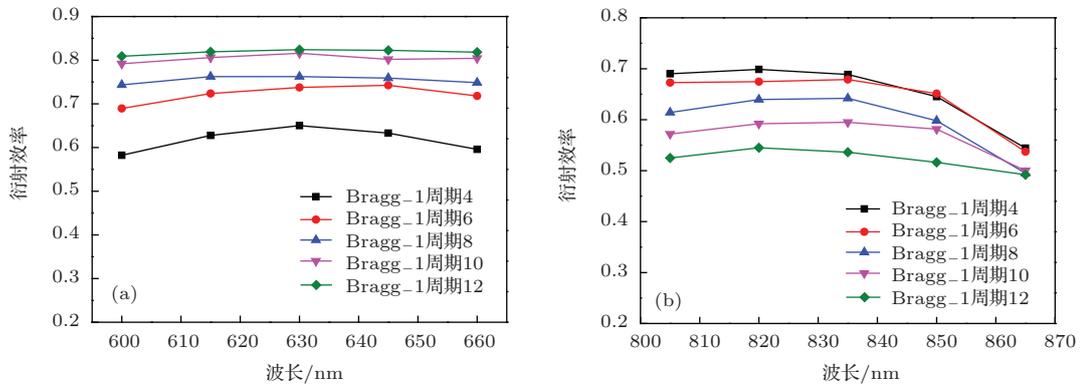


图 12 频段波长衍射效率随 Bragg₁ 周期层数的变化 (a) G₁ 频段; (b) G₂ 频段

根据 1-D 光子晶体的带隙理论, 实际设计的 Bragg 反射光栅禁带以外的频段不可能是绝对透过的, 仍会产生一定的反射损耗, 因此 G₁ 的 Bragg 周期层数太多了会增加对频段 2 波长的反射损耗, 太少了会使频段 1 波长的衍射效率下降. 为此改变凹面光栅 G₁ 中 Bragg 周期层数从 4 层到 12 层逐次增加 2 层, 计算两个频段波长衍射效率随 Bragg 周期层数的变化如图 12 所示.

从计算结果可以看出, 随着 G₁ 中 Bragg 周期层数的增加, 频段 1 的衍射效率逐渐增加, 频段 2 的逐渐减小, 且当层数增加到 6 时, 频段 1 衍射效率增加了接近 15%, 而频段 2 只是出现了小幅度下降 (约 3%); 层数 ≥ 8 后, 频段 1 的衍射效率增加明显, 而频段 2 的衍射效率大幅降低, 尤其是超过 10 层以后, 频段 2 衍射效率下降幅度更是大于 15%. 因此考虑到 G₁ 层数选择应满足既对频段 1 反射效率较高, 又对频段 2 反射损耗尽可能低, 同时还要考虑光栅材料、加工工艺等因素, 折中取 6 层. 对于凹面光栅 G₂, Bragg 周期数目取 10 层, 则既可以保

证对频段 2 的高衍射效率, 又不会太多增加工艺难度. 就此建立仿真模型得到入射光波的衍射效率如表 2.

表 2 两频段光波衍射效率仿真结果

频段 1 入射波长/ μm	衍射 效率	频段 2 入射波长/ μm	衍射 效率
0.600	0.6851	0.805	0.6903
0.615	0.7236	0.820	0.6957
0.630	0.7368	0.835	0.7246
0.645	0.7419	0.850	0.7190
0.660	0.7167	0.865	0.5754

图 13 为 G₁, G₂ 入射/衍射光场分布模拟结果. 可见, 双光栅将对应的频段分别衍射到了不同的方向, 频段 1 在经过 G₁ 时, 大部分能量被衍射到了设计角度, 只有一小部分能量透射过去; 而频段 2 经过 G₁ 时, 大部分能量透射过去并在凹面光栅 G₂ 上发生衍射, 只有小部分能量在凹面光栅 G₁ 上发生了反射.

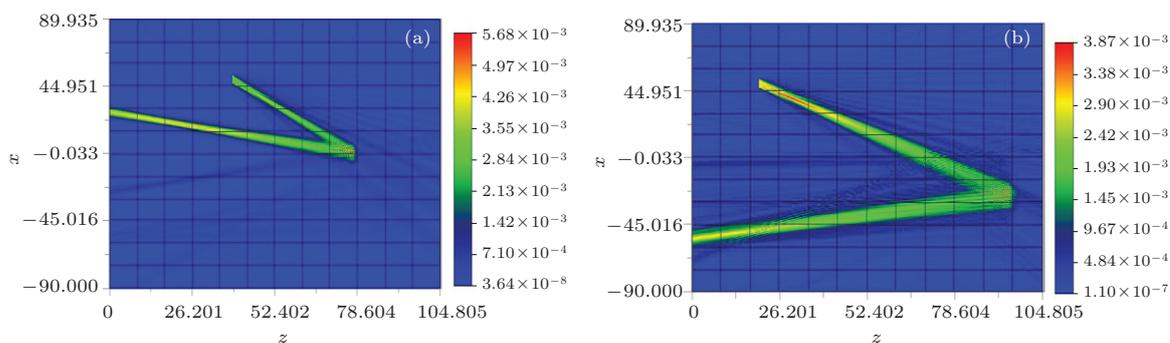


图 13 入射/衍射光场分布图 (a) 波长 630 nm, (b) 波长 835 nm

图 14 是双频段波长的衍射角度分布图, 可见该种 Bragg 衍射双光栅的结构设计实现了双频段之间的高效衍射分光: 不同的入射波长衍射到了不同的角度, 且衍射效率均在 70% 左右。

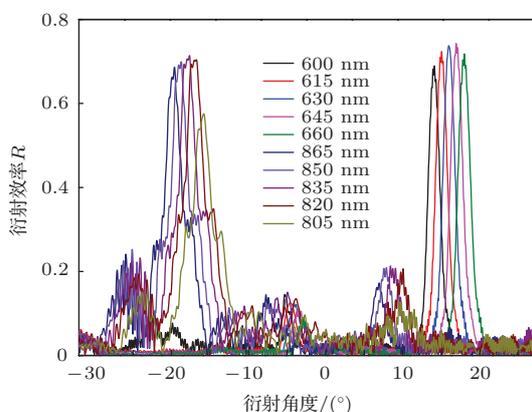


图 14 双频段对应波长衍射输出角度

4 结 论

本文提出基于 1-D 光子晶体带隙理论设计 Bragg 衍射光栅的思想, 仿真分析了 Bragg 光栅刻蚀齿的宽度误差和垂直度误差, 发现 Bragg 光栅刻蚀齿面宽度变化在 10% 范围以及垂直度误差在 10° 以内不会引起 Bragg 禁带波长范围内衍射效率的明显变化. 利用 1-D 光子晶体的选择性带通特性, 在 OptiFDTD 软件中建立了罗兰圆结构的 Bragg 衍射双光栅结构模型, 模拟结果表明: 当第一套光栅中 Bragg 周期层数为 6、第二套光栅 Bragg 周期层数为 10 时, 两频段波长的衍射效率可以达到 70% 左右, 说明利用 Bragg-EDG 衍射双光栅结构可以实现双频段范围内的高效衍射分光. 该结构设计可应用于光通信波分复用器, 如 1310 nm 波段的综合

数字服务宽带网与 1550 nm 波段的广电有线电视网络, 也可应用于近红外光谱仪等, 对于减小器件尺寸, 增加器件集成度具有重要的研究意义。

参考文献

- [1] He J J, Lamontagne B, Andre G, Erickson L, Davies M, Koteles E S 1998 *J. Lightw. Technol.* **16** 631
- [2] Song J, Sailing H 2004 *J. Opt. A* **6** 769
- [3] Erickson L, Lamontagne B, He J J, Delage A, Davies M, Koteles E 1997 *IEEE/LEOS Summer Topical Meetings on WDM Components Technology* Montreal, Canada, August 11–13, 1997 82
- [4] Sadov S Y, McGreer K A 2002 *OPL Soc. Am. A* **17** 1590
- [5] Brouckaert J, Bogaerts W, Selvaraja S, Dumon P, Baets R, Van T D 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 309
- [6] Jafari A, Kirk A G 2008 *IEEE Lasers and Electro-Optics Society* 2008, Acapulco, Nov 9–13, 2008 p59
- [7] Song J, Zhu N 2008 *Electron. Lett.* **44** 816
- [8] Wei H B, Li L F 2003 *Appl. Opt.* **42** 6255
- [9] Joshua N Winn, Fink Y, Shanhui Fan, Chiping Chen, Joannopoulos J D, Michel J, Thomas E L 1998 *Opt Lett.* **23** 1573
- [10] Fink Y, Joshua N, Winn, Fan S H, Chen C P, Michel J, Joannopoulos J D, Thomas E L 1998 *Science* **282** 1679
- [11] Xu T, Cao Z Q, Fang J H 2010 *Chin. Phys. B* **19** 040307
- [12] Zhao X X, Zhu Q F, Zhang Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2864
- [13] Shang W L, Yang J M, Zhao Y, Zhu T, Xiong G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094212 (in Chinese) [尚万里, 杨家敏, 赵阳, 朱托, 熊刚 2011 物理学报 **60** 094212]
- [14] Sun W J, Yun M J, Sun X, Liu J H, Fan Z X, Shao J D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4904 (in Chinese) [孙伟金, 云茂金, 孙欣, 刘均海, 范正修, 邵建达 2008 物理学报 **57** 4904]
- [15] Bayanheshing, Zhu H C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3893 (in Chinese) [巴音贺希格, 朱洪春 2007 物理学报 **56** 3893]
- [16] Hutley M C 1982 *Techniques of Physics* (London: Academic Press) 67

Study of the diffraction grating designed based on the Bragg reflection structure

Li Bao Zhu Jing-Ping[†] Du Bing-Zheng

(Shanxi Key Laboratory of Information Photonic Technique, Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 9 March 2014; revised manuscript received 15 May 2014)

Abstract

Based on the fact that Bragg reflection grating (BRG) is a special case of one-dimensional photonic crystal, we may apply the one-dimensional photonic crystal band gap theory to design the BRG. OptiFDTD is used to simulate both the width error and tilt angle error in BRG. It turns out that the diffraction efficiency will stay high at the 10% width error or the 10° tilt angle error of the Bragg grating. These indicate that the BRG has a high fabrication tolerance. One model of a Bragg diffraction double-grating in the Rowland circle structure is proposed based on the one-dimensional photonic crystal band gap theory for achieving the two-band spectral diffraction. Result shows that the diffraction efficiency of the two incident bands can be as high as 70% when the first set of Bragg grating periods is 6 layers while the second is 10. It is significantly higher than the traditional deeply etched diffraction grating. This is the foundation of a new type of EDG-WDMer with its advantages being of small size and high diffraction efficiency. It may have great potentiality for developing high diffraction efficiency dense wavelength division multiplexer in the future.

Keywords: one-dimensioned photonic crystal, Bragg etched diffraction grating, diffraction efficiency, Rowland circle double grating

PACS: 42.79.Dj, 42.40.Lx

DOI: [10.7498/aps.63.194209](https://doi.org/10.7498/aps.63.194209)

[†] Corresponding author. E-mail: jpzhu@mail.xjtu.edu.cn