

# 基于超表面的可见光波段布拉格反射波导研究

任尚书, 周树道<sup>1</sup>, 王敏<sup>1,2</sup>, 彭舒龄<sup>1</sup>

<sup>1</sup>解放军理工大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101;

<sup>2</sup>南京信息工程大学气象灾害预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044

**摘要** 采用 SiO<sub>2</sub>/Si 构建了可见光波段的分布式布拉格反射镜(DBR), 在其中加入 SU-8 光刻胶制备的中心腔, 构成传统的布拉格反射波导(BRW), 利用传输矩阵法分析了可见光在分布式布拉格反射镜和布拉格反射波导中的传输情况, 并研究了介质折射率比、厚度和周期数等各因素对布拉格反射镜的影响以及 SU-8 的各参量对光子带隙的影响规律。针对传统布拉格反射波导硬件制备比较困难的问题, 在 SU-8 中引入 Si 柱超表面, 构成新型的布拉格反射波导。通过实验分析了超表面对缺陷模的影响, 实验表明超表面具有调控缺陷模波长的作用, 且新型布拉格反射波导阵列可完成可见光波段的分光功能, 可用于改进光学仪器。

**关键词** 光学器件; 布拉格反射波导; 超表面; 分布式布拉格反射镜; SU-8 光刻胶; 传输矩阵法

中图分类号 O431.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.032301

## Study of Bragg Reflection Waveguide Based on Metasurface in Visible Light Band

Ren Shangshu<sup>1</sup>, Zhou Shudao<sup>1,2</sup>, Wang Min<sup>1,2</sup>, Peng Shuling<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 211101, China;*

<sup>2</sup>*Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China*

**Abstract** Distributed Bragg reflector (DBR) with visible light band is constructed by SiO<sub>2</sub>/Si. The central cavity made of SU-8 photoresist is added into it to form the traditional Bragg reflector (BRW). The transmission matrix method is used to analyze the transmission of visible light in the distributed Bragg reflector and the Bragg reflector. The effect of various factors such as medium refractive index, thickness and number of cycles on Bragg mirrors and the influence of various parameters of SU-8 on the photonic bandgap are studied. Aiming at the difficult preparation of the traditional Bragg reflective waveguide hardware, a new type of Bragg reflective waveguide is constructed, when Si metasurface is introduced into SU-8. The effect of metasurface on the defect mode is analyzed experimentally. Experiments show that the metasurface has the function of controlling the defect mode wavelength, and the new Bragg reflector waveguide array can complete beam splitting function in the visible light band. Which can be used to improve optical instruments.

**Key words** optical devices; Bragg reflection waveguide; metasurface; distributed Bragg reflector; SU-8 photoresist; transfer matrix method

**OCIS codes** 230.1480; 230.7370

## 1 引言

当两种纳米厚度及折射率均不同的材料周期排

列时, 会形成高反射率薄膜, 这个薄膜就叫分布式布拉格反射镜(DBR)。DBR 是一种特定的一维光子晶体结构, 产生光子带隙是光子晶体重要的特性之

收稿日期: 2017-08-30; 收到修改稿日期: 2017-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(41775165, 41775039)

作者简介: 任尚书(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事信息与通信工程方面的研究。E-mail: renshangshu@sina.cn

导师简介: 周树道(1964—), 男, 教授, 主要从事大气探测技术方面的研究。E-mail: zhousd70131@sina.cn(通信联系人)

一<sup>[1]</sup>。当光在光子晶体中传播时会发生布拉格散射,禁止一定频率的光子通过,该波段的光将不能沿此特定方向传播,形成“禁带”,即光子带隙<sup>[2]</sup>。DBR作为一种特定的一维光子晶体结构,就拥有这种光子带隙特性,且“禁带”内的反射率可以达到很高。DBR一方面可以抑制自发辐射,另一方面,若在DBR中引入中心腔,腔体的自发辐射会因共振而增强,导致禁带内出现缺陷模,这种结构体就是布拉格反射波导(BRW)<sup>[3-4]</sup>。传统BRW由上下DBR和中心腔组成,上下DBR可以利用光子带隙效应代替传统的反射镜来实现光场限制,而中心腔可以采用低折射率材料使可见光在“禁带”内产生缺陷模,从而在整体上实现滤光功能<sup>[5-6]</sup>。BRW中“禁带”的缺陷模可允许某些特定频率的光通过,使得BRW应用前景十分广泛,如制备高效率的激光器、高品质的激光谐振腔以及高效率的发光二极管等<sup>[7]</sup>。

传统的BRW通过改变中心腔薄膜的厚度来控制缺陷模中心频率的大小,但是由于中心腔薄膜在实际制备过程中,很难做到以细微的差异来实现高精度地控制缺陷模的中心波长,不仅精度较低,而且成本很高。本文对传统的BRW加以改造,在中心腔的内部加入超表面<sup>[8]</sup>,通过改变超表面的参量来控制缺陷模的频率大小;还通过Matlab数值运算以及Comsol构建模型分别对DBR、传统的BRW和新型BRW进行仿真,对其特性进行了分析。

## 2 理论基础

### 2.1 DBR

在DBR中传播的电磁波遵循麦克斯韦方程:

$$\nabla^2 \vec{E} + \frac{\omega^2}{c^2} [\epsilon_0 + \epsilon(x)] \vec{E} - \nabla \cdot (\nabla \cdot \vec{E}) = 0, \quad (1)$$

式中, $\vec{E}$ 为电磁波的电场矢量, $\omega$ 为电磁波频率, $c$ 为真空中光速, $\epsilon_0$ 为真空介电常数, $\epsilon(x)$ 为相对介电常数且随空间位置呈周期变化。该方程只在某些频率 $\omega$ 处有解,其他频率区域内无解。即某些频率的光波在该结构中是禁止通过的,会被完全反射,形成中心波长为 $\lambda_0$ 的光子带隙<sup>[9-10]</sup>。DBR的介质折射率 $n_H$ 、 $n_L$ 和介质层厚度 $d_H$ 、 $d_L$ 满足:

$$n_H d_H = n_L d_L = \frac{\lambda_0}{4}. \quad (2)$$

相应的禁带宽度为:

$$\Delta\lambda_0 = \frac{4\lambda_0}{\pi} \arcsin\left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}\right). \quad (3)$$

### 2.2 BRW

传统BRW的中心腔材料要求低折射率,SU-8薄膜可以使整个中心腔的曝光量均匀。SU-8的折射率为1.57,满足中心腔材料的低折射率要求。在DBR中加入SU-8后,某些入射光会与SU-8自发辐射的光在中心腔内谐振,通过DBR在“禁带”内形成“缺陷”,即波长为 $\lambda_1$ 的缺陷模。

### 2.3 新型BRW

新型BRW是在传统的BRW中加入超表面。超表面是一种基于广义折射定律,可以让一束光在特定波长范围内发生相位、振幅及偏振突变效应的微纳平面光学元件<sup>[11-12]</sup>。

超表面具有以下三个特点:

- 1) 超表面对波前的相位作用远远大于累计作用;
- 2) 尺寸较小,满足亚波长条件,可以用于光学散射体设计;
- 3) 超表面结构设计灵活,可以通过结构设计增大透射率<sup>[13]</sup>。

超表面的结构多种多样,实验设计了上下表面为正方形的Si柱结构,超表面的厚度和边长决定缺陷模中心波长 $\lambda_1$ 的大小。相对于其他结构,纳米量级的长方体Si柱的制备工艺较简单和成熟,变量控制较容易,能够达到的效果也较好。加入Si柱超表面后的BRW单元具备传统BRW的功能,而且可以利用超表面对缺陷模的中心波长进行调控,在硬件上较容易实现,新型BRW如图1所示。

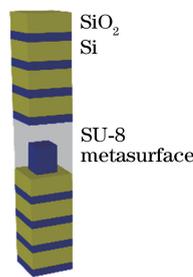


图1 新型BRW结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of new BRW

### 2.4 传输矩阵法

研究DBR的能带结构时,必须选取合适的模拟计算方法才能够得到正确的禁带。常见有多重散射法、有限时域差分法、传输矩阵法<sup>[14-15]</sup>和平面波展开法等。实验中的DBR周期数有限,用传输矩阵法将电磁场以传输矩阵的方式展开,可快速且精准计算DBR的透射谱与反射谱。

在DBR的两种介质交界面处,光线会因干涉叠

加而形成反射光和透射光<sup>[16]</sup>。用  $\mathbf{M}$  表示 DBR 入射光与出射光的关系,其本质为各层介质材料的特征矩阵的乘积,若用  $\mathbf{M}_j$  表征第  $j$  层介质的特征矩阵,以 TE 光为例,则有:

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中  $\eta_j$  为第  $j$  层介质材料的光学导纳,可以表示为:

$$\eta_j = \sqrt{\varepsilon_j / \mu_j} \cos \theta_j; \quad (5)$$

$\delta_j$  为相位厚度,可以表示为:

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} N_j d_j \cos \theta_j. \quad (6)$$

则整个 DBR 的传输矩阵  $\mathbf{M}$  可以表示为:

$$\mathbf{M} = \prod_{j=1}^N \mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

DBR 两侧电磁场的关系为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{H}_1^\top \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{n+1} \\ \eta \mathbf{E}_{n+1} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

假设 DBR 总共有  $n$  层介质薄膜,光波透过整个 DBR 则需通过  $N+1$  个介质的交界面,其中第一个介质交界面是空气和介质薄膜的接触面,其电磁场分布为:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_{i1} + \mathbf{E}_{r1} \\ \mathbf{H}_1^\top = \eta_0 (\mathbf{E}_{i1} - \mathbf{E}_{r1}) \end{cases}. \quad (9)$$

第  $N+1$  个交界面是介质和基底的接触面,其中基底可以为空气,也可以是其他介质,其电磁场分布情况为:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{N+1} = \mathbf{E}_{t(N+1)} \\ \mathbf{H}_{N+1} = \eta_s \mathbf{E}_{t(N+1)} \end{cases}, \quad (10)$$

式中  $\eta_s$  为基底介质的光学导纳,单位为西门子。由此可以得到 DBR 的反射系数为:

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12} \eta_s) \eta_c - (m_{21} + m_{22} \eta_s)}{(m_{11} + m_{12} \eta_s) \eta_c + (m_{21} + m_{22} \eta_s)}. \quad (11)$$

透射系数为:

$$t = \frac{2\eta_c}{(m_{11} + m_{12} \eta_s) \eta_c + (m_{21} + m_{22} \eta_s)}. \quad (12)$$

同时可以得到反射率  $R$  和透射率  $T$ :

$$\begin{cases} R = |r|^2 \\ T = \frac{\eta_s}{\eta_c} |t|^2 \end{cases}. \quad (13)$$

TM 波在 DBR 中能带特性的推导过程与 TE 波类似,只需把每个介质薄膜的光学导纳改为

$$\eta_j = \sqrt{\mu_j / \varepsilon_j} \cos \theta_j, \quad (14)$$

即可。

### 3 仿真结果和分析

基于 Matlab 软件,实验利用传输矩阵法对 DBR 和传统 BRW 做了数值模拟仿真,并利用 Comsol 软件对新型 BRW 进行了仿真和分析。

#### 3.1 DBR 仿真结果和分析

影响 DBR 特性的主要因素有:介质折射率比  $k$  ( $n_H/n_L$ )、介质厚度以及介质周期  $m$ 。因考虑到后期实际仪器的应用,入射光线都为垂直入射,因次实验不对入射角进行分析。以 Si 和 SiO<sub>2</sub> 作为 DBR 介质, Si 的折射率  $n_H = 3.4$ , SiO<sub>2</sub> 的折射率  $n_L = 1.47$ ,根据(2)式和可见光范围可知,当  $d_L$  在 65~125 nm 之间时,  $\lambda_0$  位于可见光范围内。

##### 3.1.1 介质折射率比 $k$ 对 DBR 性能的影响

介质周期  $m = 8$ ,低折射率介质厚度  $d_L = 90$  nm,折射率  $n_L = 1.47$ ,不改变低折射率的材料和厚度,仿真结果如图 2 和表 1 所示。

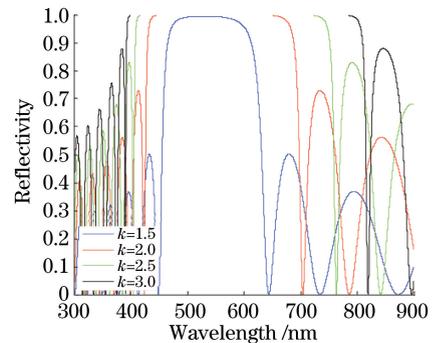


图 2 折射率比  $k$  对 DBR 性能的影响

Fig. 2 Effect of refractive index ratio  $k$  on the performance of DBR

由图 2 和表 1 可知,  $k$  由 1.5 逐渐增大到 3 时,禁带中心波长  $\lambda_0$  一直保持 529 nm 不变,而禁带范围不断增大,禁带带宽  $\Delta\omega$  由 112 nm 逐渐增加到 400 nm,且禁带截止效果越来越好。由此可知,当一种材料的折射率和厚度不变时,两种介质薄膜的折射率比不会影响禁带的中心波长;折射率比越大,禁带的带宽越大,同时 DBR 的布拉格散射也越强,禁带的边缘变得更陡直,截止度更好。但是在实际应用中,两种不同材料的折射率比不可能无限大,故选取了 4 种不同的介质材料作为研究对象,分别为 KCl、Si、SiO<sub>2</sub>、和 MgF<sub>2</sub>,这 4 种材料在 400~700 nm 波段均可见,特别是当它们的厚度小于 100 nm 时均为透明。将这 4 种介质材料相互组合,形成了 Si/KCl、Si/SiO<sub>2</sub>、Si/MgF<sub>2</sub> 三种典型的可见光波段的 DBR,如表 2 所示。

表1 折射率比  $k$  对 DBR 性能的影响Table 1 Effect of refractive index ratio  $k$  on the performance of DBR

Refractive index ratio $k$	Central wavelength $\lambda_0$ /nm	Range of forbidden band $\omega$ /nm	Forbidden bandwidth $\Delta\omega$ /nm
1.5	529	497-566	69
2	529	438-668	230
2.5	529	413-736	323
3	529	396-796	400

表2 不同 DBR 组合类型

Table 2 Different combination types of DBR

Structural sequence number	Structure	Refractive index ratio	Medium thickness $d_H/d_L$	Cycle
One	Si(3.4)/MgF <sub>2</sub> (1.39)	2.44	40/97.8	8
Two	Si(3.4)/KCl(1.49)	2.28	40/91.3	8
Three	Si(3.4)/SiO <sub>2</sub> (1.47)	2.31	40/92.5	8

对上述三种组合结构进行仿真,结果如图 3 所示。

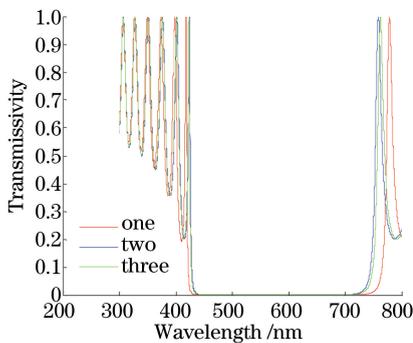


图3 不同 DBR 组合类型

Fig. 3 Different combination types of DBR

从此可以看出,三种结构体的禁带中心波长基本一样,中心波长不会受折射率比影响,Si/MgF<sub>2</sub>的禁带宽度略大于 Si/SiO<sub>2</sub> 结构体,更大于 Si/KCl 结构体,三者之间的禁带宽度差别不大,主要是因为三种材料的折射率比相差比较小,已经接近极限值。由于 Si 和 SiO<sub>2</sub> 都是常见的物质,成本较低,且制作工艺更成熟,考虑到后期实际制备的需求,后期实验选用 Si/SiO<sub>2</sub> 结构体。

### 3.1.2 介质厚度对 DBR 性能的影响

选用 Si/SiO<sub>2</sub> 结构体,介质周期  $m = 8$  进行介质厚度对 DBR 性能的影响分析,结果如图 4 和表 3 所示。

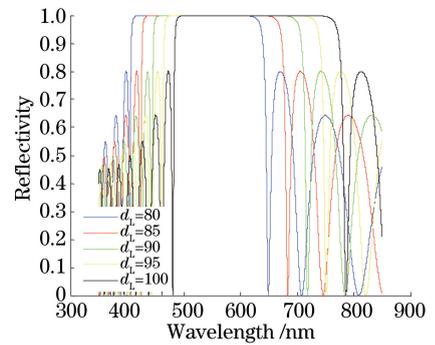


图4 介质厚度对 DBR 性能的影响

Fig. 4 Effect of medium thickness on the performance of DBR

表3 介质厚度对 DBR 性能的影响

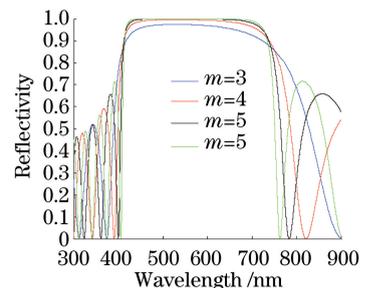
Table 3 Effect of medium thickness on the performance of DBR

Medium thickness $d_L$ /nm	Central wavelength $\lambda_0$ /nm	Range of forbidden band $\omega$ /nm	Forbidden bandwidth $\Delta\omega$ /nm
80	470	412-627	215
85	500	432-660	228
90	529	451-694	243
95	559	470-726	256
100	588	490-759	269

由图 4 和表 3 可见,当低折射率介质的厚度  $d_L$  以 5 nm 为间隔由 80 nm 增加到 100 nm 时,禁带的中心波长  $\lambda_0$  由 470 nm 逐渐增加到 588 nm,每次增加大约 30 nm;禁带的带宽  $\Delta\omega$  也由 215 nm 增大到 269 nm,每次增加约 13 nm。由此可知,介质厚度对禁带的带宽和中心波长都有影响。介质越厚,禁带越宽,且禁带整体发生红移,即向波长较大的波段移动;当介质厚度等间隔增加时,中心波长  $\lambda_0$  和带宽  $\Delta\omega$  也等间隔增大,满足(2)式和(3)式。

### 3.1.3 介质周期 $m$ 对 DBR 性能的影响

选用 Si/SiO<sub>2</sub> 结构体,介质厚度  $d_L = 90$  nm、 $d_H = 39$  nm,分析  $m$  对 DBR 性能的影响,结果如图 5 所示。

图5 介质周期  $m$  对 DBR 性能的影响Fig. 5 Effect of medium period  $m$  on the performance of DBR

一个 DBR 单元包括两个介质薄膜, 整个 DBR 则由  $m$  个 DBR 单元构成,  $m$  即为介质周期。  $m$  对禁带的截止效果有很大的影响, 由图 5 可知, 当  $m$  变大时, 反射率在禁带内也越接近于 1, 禁带的边缘也变得更陡直, 且截止度变好, 而  $m$  对禁带的中心波长  $\lambda_0$ 、禁带范围  $\omega$  和带宽  $\Delta\omega$  都没有影响, 因此介质周期  $m$  主要影响禁带的截止效果。 因为一个周期的 DBR 对光子的消减能力是一定的,  $m$  的增加会使 DBR 对光子的消减作用得到累积, 禁带效果也就更加明显。

### 3.2 传统 BRW 仿真结果

BRW 会产生缺陷模, 缺陷模的分辨率、透射率和中心波长  $\lambda_1$  决定了 BRW 的分光性能, 因此其会受到单侧 DBR 的介质周期  $m$  以及 SU-8 厚度  $H_1$  的

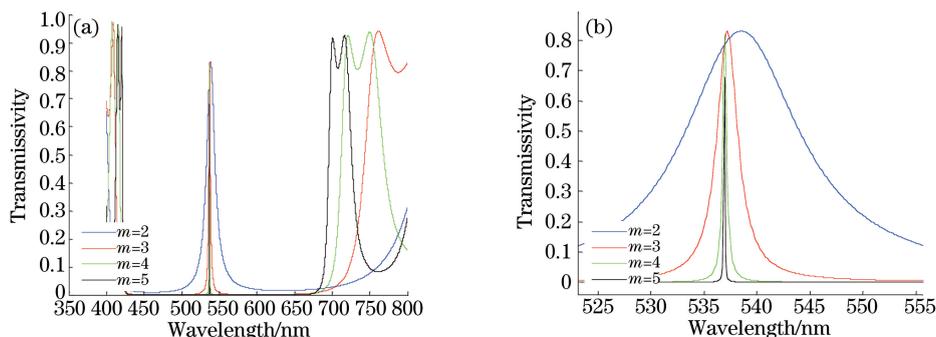


图 6 (a) 介质周期  $m$  对缺陷模的影响; (b) 缺陷模放大图

Fig. 6 (a) Effect of medium period  $m$  on defect modes; (b) enlarged drawing of defect modes

### 3.2.2 SU-8 厚度对缺陷模的影响

由图 7 可知, 当 SU-8 厚度  $H_1$  变大时, 缺陷模的中心波长  $\lambda_1$  也会随之增大, 发生红移现象; 而  $H_1$  对于透射率的影响并不大。 另外, 当 SU-8 的厚度不小于 150 nm 时, 禁带内会出现两个缺陷模, 这是因为缺陷模是周期出现的, 当 SU-8 厚度过大时, 就会出现两个缺陷模, 且两个缺陷模在光电收集过程中能量会混合在一起, 无法区别。 由此可知, 改变 SU-8 的厚度可以调控缺陷模的中心

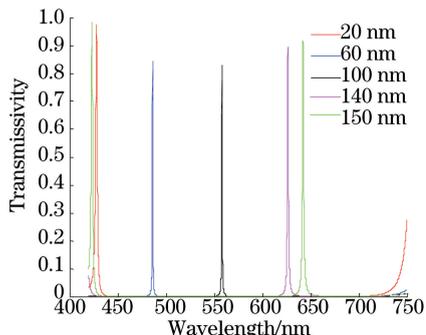


图 7 SU-8 厚度对缺陷模的影响

Fig. 7 Effect of SU-8 thickness on defect modes

影响。 以下实验中 DBR 均采用 Si/SiO<sub>2</sub> 结构体, 介质厚度  $d_L=90$  nm、 $d_H=39$  nm。

### 3.2.1 介质周期 $m$ 对缺陷模的影响

单侧介质周期  $m$  对缺陷模的中心波长  $\lambda_1$  没有影响, 都约为 537 nm。 根据放大图可以看到,  $m=2$  时  $\lambda_1$  比较大, 主要是因为  $m$  过小, DBR 的滤波效果比较差, 使得  $\lambda_1$  会有较大偏差。 另外, 由放大图可知,  $m$  越大, 缺陷模的带宽越小, 可实现分辨率也就越高; 当  $m=4$  时, 分辨率即可达到几纳米; 同时, 随着  $m$  的增大, 缺陷模的峰值会减小, 这是因为介质周期的增加对缺陷模的透射率会有消减作用。 因此在实际应用中可以根据需求选择合适的介质周期, 实验选用单侧介质周期为 4 的结构体。

波长, 但由于缺陷模的周期问题, SU-8 调控缺陷模的范围仅为 427.8~626.4 nm, 显然无法覆盖全可见光波段。 另外, 由于 SU-8 的胶体性质, 利用 SU-8 厚度细微差异来控制缺陷模非常困难, 不仅精度很低, 而且成本较高, 因此实验在 BRW 中加入了超表面结构体。

### 3.3 新型 BRW 仿真结果

通过 Comsol 软件建立一个单边  $m=4$  的新型 BRW 单元结构, 如图 8(a) 所示, 蓝色区域为 Si 柱, 空白区域为 SiO<sub>2</sub>, 中间空白区域为 SU-8 中心腔, 内含 Si 柱超表面, 其入光口设置在波导的上方, 出光口在其下方。 加入超表面以后, 存在多个因素对缺陷模产生影响, 包括 SU-8 的厚度  $H_1$ 、超表面的厚度  $H_2$ 、SU-8 的边长  $L_1$ , 超表面的边长  $L_2$ 。 首先确定新型 BRW 单元的分光功能, 设置各变量分别为  $H_1=100$  nm、 $H_2=50$  nm、 $L_1=200$  nm、 $L_2=100$  nm, 仿真结果如图 8 所示。

图 8 中  $R$  为 DBR 衬底处的反射率,  $T$  为透射率,  $A$  为吸收率。 根据图 8 的内部电场图, 波长为

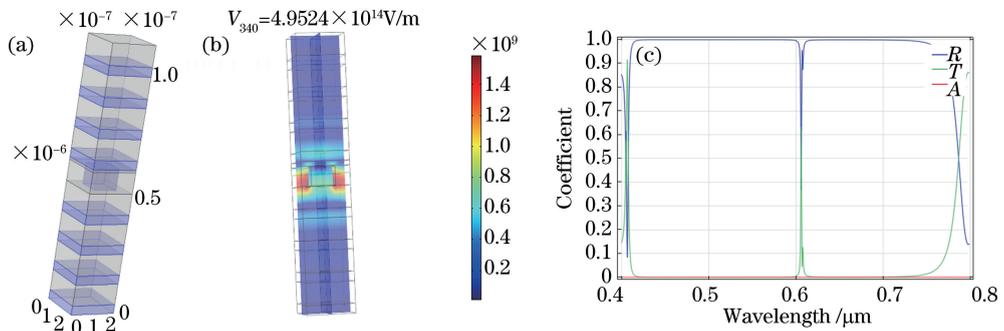


图 8 新型 BRW 结构图和仿真结果。(a) BRW 结构体;(b)内部电场图;(c)一维电场图

Fig. 8 Structure and simulation results of new BRW.

(a) Structures of BRW; (b) internal electrical field; (c) one-dimension electrical field

600 nm 的光在中心腔和超表面内的光强明显强于入光口处的光强,这是因为该波段光会与中心腔内的自发辐射产生谐振,增强了自身光强。同时,根据出光口处的一维电场仿真图可以看到,当介质厚度  $d_L = 90$  nm、 $d_H = 39$  nm 时,新型 BRW 在 410~760 nm 波长范围内有禁带产生,也就是前面所说的光子晶体的光子带隙效应,禁带的宽度和

中心波长由 DBR 的介质厚度、介质材料以及介质周期共同决定,与传统 BRW 一致。另外在 600 nm 处有缺陷模存在,缺陷模的透射率达到 0.7,效果比较理想,即新型 BRW 结构体能够达到传统 BRW 的滤波效果。超表面对缺陷模的中心波长有调控作用,选取两个不同边长的超表面进行仿真,结果如图 9 所示。

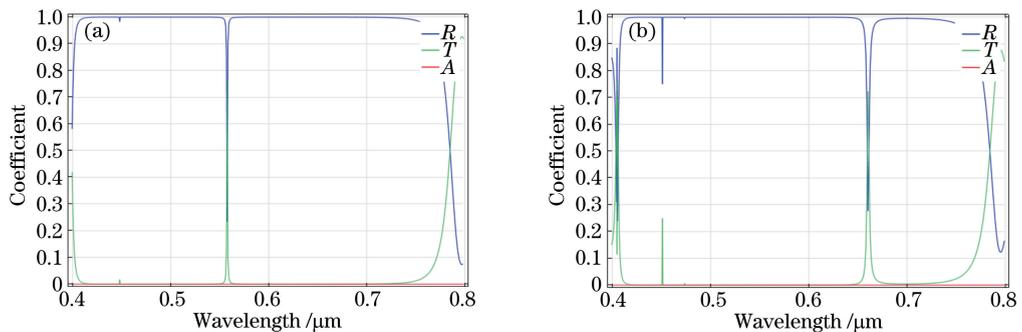


图 9 超表面边长对缺陷模的影响。(a)  $L_2 = 20$  nm;(b)  $L_2 = 160$  nm

Fig. 9 Effect of length of metasurface on defect modes. (a)  $L_2 = 20$  nm; (b)  $L_2 = 160$  nm

通过图 8 和图 9 可以看到,当其他因素都固定以后,缺陷模会随着超表面的边长增大而红移,并且在 550~670 nm 之间移动,说明超表面的边长可以控制缺陷模的中心波长。由此可知,缺陷模中心波长的调控范围是由 SU-8 的厚度和超表面的厚度共同决定的,当超表面边长过大时,禁带内会出现双缺陷模,这是因为缺陷模是呈周期出现的,符合光在中心腔内的传播规律。由于超表面的调控范围有限,若要缺陷模的调控范围尽可能覆盖整个禁带,需对 SU-8 的厚度  $H_1$ 、超表面的厚度  $H_2$ 、SU-8 的边长  $L_1$ 、超表面的边长  $L_2$  这 4 个要素进行整体仿真,如图 10 和表 4 所示。

通过大量的实验结果图对比可知,SU-8 的厚度

决定了缺陷模调控范围的起点,即最小中心波长,SU-8 厚度的增加会导致缺陷模的红移,也就是 SU-8 越厚,最小中心波长越大;当 SU-8 的厚度确定以后,超表面的厚度就决定了缺陷模调控范围的终点,即最大中心波长,它会随着超表面厚度的增加而变大。但是经过大量实验证明,超表面的厚度保持在 40~50 nm 效果比较好,可以避免禁带内存在双缺陷模等问题;SU-8 的边长会影响缺陷模的透射率,当 SU-8 的厚度较大时,增大 SU-8 边长可以增加透射率。通过表 4 可以看到,当改变各个要素后,缺陷模的调控范围变为 440~700 nm,已经基本覆盖了禁带范围。对超表面的边长进行细化扫描,实验时  $x$  系数取 0.01,可得图 11。

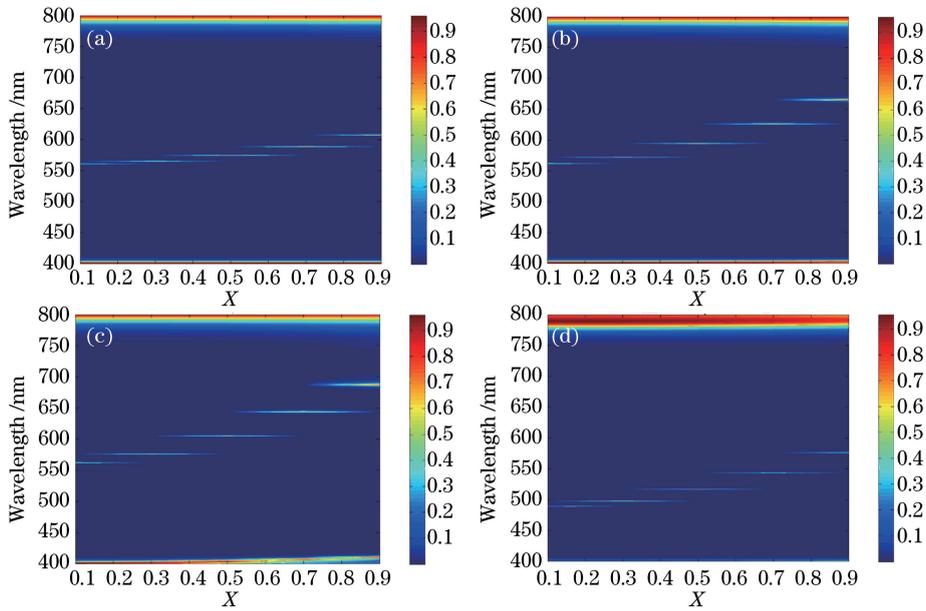


图 10 新型 BRW 扫描结果。(a)  $H_1=100$  nm,  $H_2=10$  nm,  $L_1=200$  nm,  $L_2=L_1x$ ; (b)  $H_1=100$  nm,  $H_2=30$  nm,  $L_1=200$  nm,  $L_2=L_1x$ ; (c)  $H_1=100$  nm,  $H_2=50$  nm,  $L_1=200$  nm,  $L_2=L_1x$ ; (d)  $H_1=60$  nm,  $H_2=30$  nm,  $L_1=200$  nm,  $L_2=L_1x$

Fig. 10 Scanning results of new BRW. (a)  $H_1=100$  nm,  $H_2=10$  nm,  $L_1=200$  nm,  $L_2=L_1x$ ; (b)  $H_1=100$  nm,  $H_2=30$  nm,  $L_1=200$  nm,  $L_2=L_1x$ ; (c)  $H_1=100$  nm,  $H_2=50$  nm,  $L_1=200$  nm,  $L_2=L_1x$ ; (d)  $H_1=60$  nm,  $H_2=30$  nm,  $L_1=200$  nm,  $L_2=L_1x$

表 4 新型 BRW 扫描结果

Table 4 Scanning results of new BRW nm

SU-8 thickness	Metasurface thickness	SU-8 length	Metasurface length	Regulation range
30	15	100	10-90	440-460
50	40	100	10-90	460-550
60	40	200	20-180	490-590
80	40	200	20-180	520-630
100	40	200	20-180	560-680
120	40	200	20-180	600-700

由图 11 可以看到,当超表面边长较小时,透射峰较密,分辨率较高;边长越大,分辨率越低。但也可以达到纳米级别的分辨率要求,因此新型 BRW

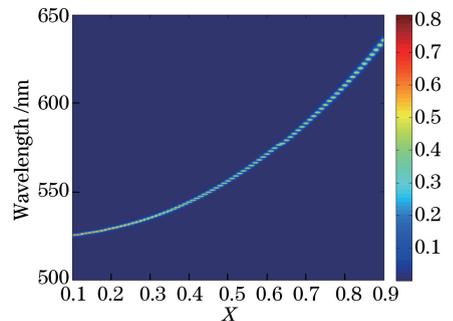


图 11 新型 BRW 细化扫描结果

Fig. 11 Refine scanning results of new BRW 缺陷模的分辨率很高。综合各因素,可以构建 BRW 阵列,如图 12 所示。

在一个 BRW 阵列中,以同一个 DBR 和 SU-8

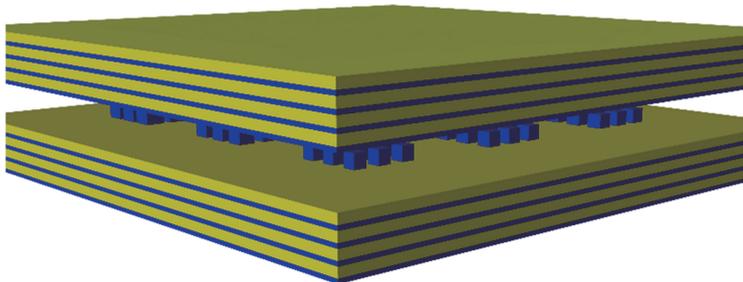


图 12 新型 BRW 阵列

Fig. 12 New BRW array

中心腔为衬底,中心腔内的超表面分为不同的方阵,每个方阵内的超表面尺寸完全相同,允许同一波段的光通过,可以增加同一波段光的光通量;不同方阵之间的超表面尺寸有差异,主要是因为超表面的边长不同。根据不同厚度的 SU-8 设计不同的波导阵列,通过优化,只需两三个阵列就可以实现 440~700 nm 波段的分光功能。

## 4 结 论

本文利用传输矩阵法,对 DBR 和传统 BRW 进行了数值模拟仿真,分析了各参量对其禁带和缺陷模的影响。同时在传统 BRW 的基础上引入超表面,对多变量进行仿真分析,结果表明,超表面对缺陷模具有调控作用,解决了传统 BRW 工艺不易实现的难题。综合各因素,新型 BRW 缺陷模调控带宽要比传统 BRW 大,且分辨率更高,可以达到纳米级别。新型 BRW 解决了制备上的难题,无需制备各种不同厚度的 SU-8 薄膜,只需几个特定厚度的 SU-8 薄膜,然后通过制备不同边长的超表面就可以覆盖大部分的可见光波段,实现了制备工艺上的简化。总之,新型 BRW 可以用于制备光学天线阵列,实现不同波段可见光的同时分光,有助于改进光学仪器。

## 参 考 文 献

- [1] Li Z C, Liu B, Zhang R, *et al.* Design and fabrication of  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  dielectric distributed Bragg reflectors for ultraviolet optoelectronic applications [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(8): 087802.  
李志成, 刘斌, 张荣, 等. 紫外波段  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  介质膜分布式布拉格反射镜的制备与研究 [J]. *物理学报*, 2012, 61(8): 087802.
- [2] Deng L E, Gong L. Reflection characteristics of one-dimensional polybasic photonic crystals by using heterostructure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(5): 0516002.  
邓立儿, 巩蕾. 一维三元异质结构光子晶体反射特性 [J]. *光子学报*, 2016, 45(5): 0516002.
- [3] Qian C J, Xie X, Yang J N, *et al.* Coupling of two-dimensional slab photonic crystal micro-cavities and waveguides [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 030001.  
钱琛江, 谢昕, 杨静南, 等. 二维平板光子晶体微腔与波导的耦合 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 030001.
- [4] Wei J J, Su A, Tang X F, *et al.* Effect of

asymmetric on transmission properties of one-dimensional ternary photonic crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S2): S221002.

韦吉爵, 苏安, 唐秀福, 等. 不对称度对一维三元对称结构光子晶体透射特性的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(S2): S221002.

- [5] Liu H, Yao J Q, Li E B, *et al.* Theoretical analysis of optimum parameters for complete forbidden bands of three-dimensional photonic crystals with typical lattice structures [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(1): 230-237.  
刘欢, 姚建铨, 李恩邦, 等. 三维光子晶体典型结构完全禁带的最佳参数理论分析 [J]. *物理学报*, 2006, 55(1): 230-237.
- [6] Rinne S A, Garcia-Santamaria F, Braun P V. Embedded cavities and waveguides in three-dimensional silicon photonic crystals [J]. *Nature Photonics*, 2007, 2(1): 52-56.
- [7] Han P D, Zhang L, Wang C, *et al.* Doped modes of  $\text{SiO}_2/\text{CdSe}$  one-dimensional photonic crystals with  $\text{LiTaO}_3$  in visible region [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(1): 76-79.  
韩培德, 张璐, 王灿, 等. 可见光波段  $\text{SiO}_2/\text{CdSe}$  一维光子晶体及缺陷模的研究 [J]. *光子学报*, 2010, 39(1): 76-79.
- [8] Zhou X, Wang H B, Dong J F. Research advances of electromagnetic properties of metasurface [J]. *Materials Review*, 2016, 30(7): 49-54.  
周霞, 汪会波, 董建峰. 超表面的电磁特性研究进展 [J]. *材料导报*, 2016, 30(13): 49-54.
- [9] Gao X Y, Dong X H, Liu X W, *et al.* Theoretical design of one-dimensional photonic crystals for the visible spectrum [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, 27(5): 566-572.  
郜小勇, 董晓慧, 刘绪伟, 等. 可见光波段的一维光子晶体的理论设计 [J]. *半导体光电*, 2006, 27(5): 566-572.
- [10] Ma J, Wu X Y, Liu X J, *et al.* Research on the absorption property of defect layer in photon crystals [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(3): 0306002.  
马季, 吴向尧, 刘晓静, 等. 光子晶体缺陷层吸收特性的研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0306002.
- [11] Yu N, Genevet P, Kats M A, *et al.* Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [12] Huang X C, Fu Q H, Zhang F L. Research

- Advances of metasurface [J]. *Aero Weaponry*, 2016 (1): 28-34.
- 黄新朝, 付全红, 张富利. 超表面研究进展 [J]. *航空兵器*, 2016(1): 28-34.
- [13] Liu C L, Dou Y, Chen C, *at al.* Performance of oxygen passivation silicon-based ZnO/nanoporous Si pillar array heterojunction near white light LED [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 112302.
- 刘春玲, 窦宇, 陈琛, 等. 氧钝化硅基 ZnO/纳米多孔硅柱状阵列异质结近白光 LED 的性能 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(11): 112302.
- [14] Pendry J B, MacKinnon A. Calculation of photon dispersion relations [J]. *Physical Review Letters*, 1992, 69(19): 2772-2775.
- [15] Katsidis C C, Siapkas D I. General transfer-matrix method for optical multilayer systems with coherent, partially coherent, and incoherent interference [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(19): 3978-3987.
- [16] Li X X. Study on the trapping and filtering properties of one-dimensional photonic crystals in all visible region [J]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- 李祥霞. 全可见光区域一维光子晶体陷光及滤波性能的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2014.