

基于杂化表面等离子激元的多层波导布拉格光栅

王泉, 肖经, 韦启钦, 刘平

桂林电子科技大学机电工程学院, 广西 桂林 541004

摘要 根据杂化表面等离子激元的产生机理和传统杂化表面等离子激元的波导结构, 提出了一种多层波导布拉格光栅结构。该结构采用 SiO₂ 和 NaF 两种低折射率介质作为芯层, 形成了多层波导布拉格光栅的结构。在 1550 nm 通信波长下, 围绕光波的传输距离和模场限制能力对光栅的结构进行了研究及优化。在此基础上, 进一步分析了光栅周期数与光波反射率之间的关系。仿真结果表明: 该光栅的传输距离和有效模场面积分别为 178.12 μm 和 0.203 μm²; 该结构不仅可以降低金属表面对光场限制所形成的损耗, 而且表现出了较强的模场限制能力; 当周期数为 60 时, 光波的反射率能够达到 71.9%, 该结构具有良好的滤波特性。

关键词 衍射; 布拉格光栅; 杂化表面等离子激元; 低折射率材料; 滤波特性; 光学器件

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0105002

Multilayer Waveguide Bragg Grating Based on Hybrid Surface Plasmon Polaritons

Wang Quan, Xiao Jing, Wei Qiqin, Liu Ping

School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guangxi, Guilin 541004, China

Abstract According to the excitation mechanism of hybrid surface plasmon polaritons and the waveguide structure of traditional hybrid surface plasmon polaritons, a multilayer waveguide Bragg grating is proposed. Two low refractive index materials, SiO₂ and NaF, are used as the core layer in the structure. At the communication wavelength of 1550 nm, the structure of the grating is studied and optimized for the transmission distance and the mode field limitation ability of the light wave. And the relationship between the grating period number and the reflectivity of light wave is further analyzed. Simulation results show that the transmission distance and the effective mode field area of the Bragg grating are 178.12 μm and 0.203 μm², respectively. The structure not only reduces the loss due to the light field limitation at the metal surface, but also reflects relatively strong mode field limitation. The reflectance can reach 71.9% when the grating period number is 60, and the structure has a good filtering characteristic.

Key words diffraction; Bragg grating; hybrid surface plasmon polaritons; low refractive index material; filtering characteristic; optical device

OCIS codes 050.2770; 060.3735; 310.6628

1 引 言

随着现代光通信技术的发展, 传统的光学器件已难以满足大容量、高速率的数据通信要求。波导布拉格光栅是一种基于脊状光波导制成的光栅, 具有结构简单、易于制造、与互补金属氧化物半导体

(CMOS)兼容等特点, 广泛应用于光滤波器、光开关、光纤传感器和光学耦合器等集成光子器件中^[1-6]。作为波导的衍生器件, 如何实现更高的集成度、更低的传输损耗是波导布拉格光栅目前遇到的瓶颈。表面等离子激元(SPPs)作为一种存在于金属表面区域的特殊电磁波^[7], 可以使光在模场尺寸上

收稿日期: 2017-06-22; 收到修改稿日期: 2017-08-28

基金项目: 桂林电子科技大学研究生科研创新项目(2017YJXC05, 2016YJXC99)

作者简介: 王泉(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事微纳光子器件方面的研究。E-mail: 1601302039@mails.guet.edu.cn

导师简介: 肖经(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光通信与光无源器件方面的研究。E-mail: xiaojing@guet.edu.cn (通信联系人)

突破衍射极限,获得较长的传输距离。其中,介质/金属/介质(IMI)和金属/介质/金属(MIM)这两类对称型 SPPs 波导被广泛研究^[8-10]。IMI 波导在光传播时具有较低的损耗,从而使得传输距离更长,因此又被称作长程表面等离子元光波导,但其横向光场偏大,导致结构无法更加紧凑。MIM 波导虽然可以很好地限制光场,但由于损耗大、传输距离短,难以成为制作波导布拉格光栅的性能优异的基础器件。此外,传统的绝缘体上硅(SOI)波导的传输距离很长,被广泛用于制作波导布拉格光栅^[11-12]。然而,和 IMI 波导一样,SOI 波导存在模场限制能力较弱的缺陷。针对上述器件存在的不足,张翔教授提出了杂化表面等离子元的波导结构^[13]。该结构的光场限制能力强,而且能大幅降低传输损耗,引起了众多研究者的关注^[14-16]。但它仍存在光被限制在金属表面而产生额外能量损耗的问题。例如,1550 nm 波段下杂化表面等离子元波导的传播距离约为 46.7 μm ^[17]。而传输特性的优劣将直接影响波导布拉格光栅的反射滤波特性。

在此基础上,为了使光栅具有更好的反射滤波特性,针对较小的模场面积、较低的传输损耗和较长的光栅长度,本文提出了一种具有双介质层的多层波导布拉格光栅(MWBG)结构。该结构在杂化表面等离子元波导的基础上,于低折射率介质层与高折射率介质层之间添加一层折射率更低的介质层,形成狭缝波导的结构。利用三种介质之间的折射率差可以将光场进行两次压缩,形成一种独特的狭缝波导效应,使光最终被限制在折射率最低的介质层中传输,从而实现了结构的小型化。同时,由于压缩后的光场与金属之间存在一定的间距,因此降低了杂化表面等离子元波导中额外的能量损耗,使传输距离变长。此外,光栅的周期数越多,对于其滤波特

性来说越好,所获得的带宽也越窄。因此,该光栅非常适合用于光滤波器、光纤传感器等集成光学器件的设计研究。

2 端面结构的设计与优化

首先针对 MWBG 的端面结构进行设计,并在分析过程中优化了结构参数和模场限制能力之间的关系。将 x 轴设定为波的传输方向, y 轴和 z 轴分别为器件的宽度方向和高度方向。MWBG 的端面结构如图 1(a)所示。从图中可以看出,整个波导是一个以 Ag 为基底形成的多层叠加的矩形波导结构,自下而上的材料分别为 SiO_2 、NaF 和 Si。由于不同波长下的折射率会随之变化,因此该结构中的各层材料在 1550 nm 波长下的折射率分别为 $n_{\text{NaF}} = 1.319$ ^[18]、 $n_{\text{Si}} = 3.45$ 、 $n_{\text{SiO}_2} = 1.45$ 、 $n_{\text{Ag}} = 0.1453 + 11.3587i$ ^[19]。对于波导的外覆盖层,假定折射率 $n_0 = 1$ 的空气为它的介质。此外,为了方便进行数值计算与说明,对 MWBG 的端面结构进行了参数定义。其中, W 为整个矩形结构的宽度, H_{Si} 为顶层 Si 的厚度, H_{SiO_2} 和 H_{NaF} 分别为 SiO_2 层和 NaF 层的厚度。为了保证以横磁模为传输模式的电磁波在结构中传播, W 设定为 200 nm^[20]。在以下的设计过程中,通过 COMSOLTM 软件,用有限元方法对 MWBG 端面结构的模态特性进行研究与分析。

图 1(b)和图 1(c)给出了当 SiO_2 层和 NaF 层的厚度分别为 120 nm 和 40 nm 时,1550 nm 光波垂直入射到 MWBG 端面后, z 向截面电场分量 $|E_z|$ 在 $(x=0, y=0)$ 上的分布以及 y 向截面电场分量 $|E_y|$ 在 $(x=0, z=0)$ 上的分布,右上方的插图分别为相应的模场图。从图中可以看出,在 $120 \text{ nm} \leq z \leq 160 \text{ nm}$ 和 $-100 \text{ nm} \leq y \leq 100 \text{ nm}$ 范围内的电场强度要高于其他范围的,说明该波导结构可以将电场

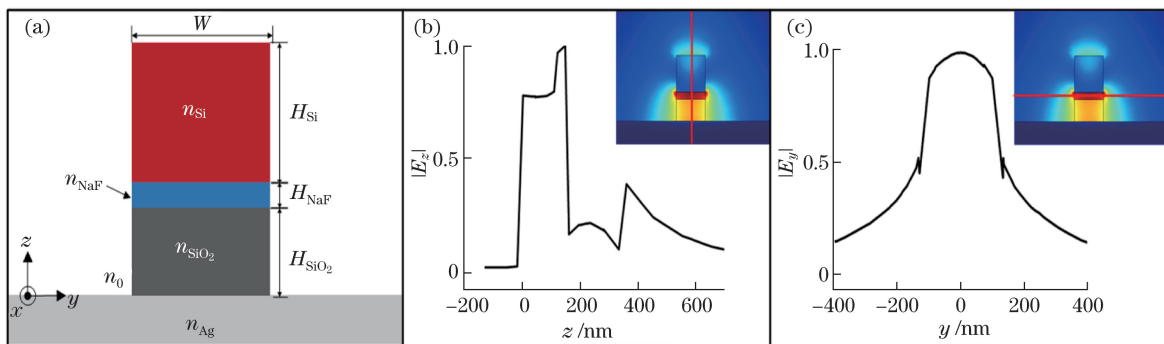


图 1 MWBG 端面结构和电场分布。(a) 端面结构;(b) z 向的电场分布;(c) y 向的电场分布
 Fig. 1 End face structure of MWBG and electric field distribution. (a) Structure;
 (b) electric field distribution along z direction; (c) electric field distribution along y direction

限制在 $200\text{ nm} \times 40\text{ nm}$ 的区域内,比其他 SPPs 波导具有更强的电场约束能力^[21]。为了更好地说明结构中的电场强度分布,通过设置归一化能量(NOP)来计算波导各层的能量与总能量的比值^[16]。电磁能量密度 $W(\mathbf{r})$ 的表达式为^[17]:

$$W(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{d[\omega \epsilon(\mathbf{r})]}{d\omega} \right\} |E(\mathbf{r})|^2 + \frac{1}{2} \mu_0 |H(\mathbf{r})|^2, \quad (1)$$

式中 ω 为角频率, $\epsilon(\mathbf{r})$ 为相对介电常数, μ_0 为真空磁导率, $E(\mathbf{r})$ 和 $H(\mathbf{r})$ 为传输过程中的电场和磁场强度, \mathbf{r} 为位置矢量。通过计算可知, SiO_2 层、NaF 层和 Si 层的 NOP 值分别为 19.9%、15.8% 和 12.9%, 说明能量主要集中在 NaF 层, 这与模场图中的红色部分相吻合。由此说明该器件能够突破光的衍射极限, 可以将光紧紧地限制在仅有几十纳米厚的 NaF 层内。产生这种纳米级限制能力的主要原因是该狭缝波导首先利用 Si 与 SiO_2 的高折射率差将光场限制在 SiO_2 层中, 再利用 NaF 与 SiO_2 的折射率差对以杂化等离子激元模式存在的光场进行进一步压缩, 类似于顶部 Si 与 SiO_2 相互作用形成的狭缝波导效应, 使能量聚集在 NaF 层内, 增强了对模场的限制能力。

有效折射率(n_{eff})是反映光传输模式的主要物理量之一,其实部 $\operatorname{Re}(n_{\text{eff}})$ 表示介质对电磁波的色散,而虚部 $\operatorname{Im}(n_{\text{eff}})$ 则表示传输过程中电磁波的损耗程度,根据这两个参数可以对结构性能是否优良进行评估。在 SiO_2 层厚度为 120 nm 的条件下,以 10~60 nm 作为 NaF 层厚度的变化范围,对 MWBG 端面的有效折射率进行分析。如图 2 所示,有效折射率的实部和虚部都随着 H_{NaF} 的增加呈现出下降的趋势,虚部下降得较快,从 8.8073×10^{-4} 减小到 6.8492×10^{-4} ,而实部则从 1.2567 减小到 1.1928,下降幅度较为平缓。由此说明当 NaF 层厚度增加时,光波的传输损耗减小,即结构可以提供较长的传输距离。

为了进一步探究 MWBG 端面结构与模场限制能力、传输距离之间的关系,以有效折射率的虚部 $\operatorname{Im}(n_{\text{eff}})$ 、传输距离 L 、归一化有效模场面积 A_{eff}/A_0 和品质因子 α_{FOM} 作为衡量性能的参数,对芯层中两个介质层的厚度进行研究与优化。其中,传输距离表示当电场强度降至初始值的 $(1/e)^2$ 时的传输距离,一般可以用公式 $L = \lambda / [4\pi \operatorname{Im}(n_{\text{eff}})]$ 计算得出^[13,17]。归一化有效模场面积 A_{eff}/A_0 无量纲,其分母指的是有效模场面积(可以由 $A_0 = \lambda^2/4$ 得出),分子则表示

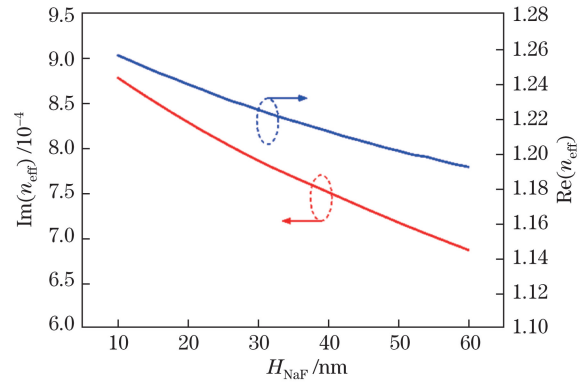


图 2 NaF 层厚度与有效折射率虚部和实部的关系
Fig. 2 Relation of $\operatorname{Re}(n_{\text{eff}})$ and $\operatorname{Im}(n_{\text{eff}})$ with the thickness of NaF layer

衍射极限区域的面积^[13],计算公式如下

$$A_{\text{eff}} = \left[\iint W(\mathbf{r}) dA \right] / \left\{ \max[W(\mathbf{r})] \right\}. \quad (2)$$

此外,通过定义品质因子 α_{FOM} 可以更好地理解优化结果,其表达式为 $\alpha_{\text{FOM}} = L / [A_{\text{eff}}/A_0]$ ^[13]。可以看出,品质因子与传输长度成正比,与归一化模场面积成反比。

图 3 绘制了性能衡量参数与两个介质层厚度之间的关系。由图 3(a) 可以看到:当 SiO_2 层的厚度从 40 nm 增加到 120 nm 时,有效折射率的虚部逐渐变小,当 NaF 层的厚度分别取 10, 20, 30, 40 nm 时,有效折射率虚部的变化趋势是一样的;当 SiO_2 层的厚度固定时,有效折射率的虚部随 NaF 层厚度的增加而减小。图 3(b) 给出了 SiO_2 层厚度从 40 nm 增加到 120 nm 时传输距离的变化情况,其变化趋势正好和图 3(a) 相反。从图 3(c) 可以看出:当归一化有效模场面积小于 1 时,器件的光场被紧紧限制在亚波长区域中;当 NaF 层的厚度为 10, 20, 30, 40 nm 时,归一化有效模场面积随着 SiO_2 层厚度的增加表现为近乎线性增加。图 3(d) 描述了在不同 NaF 层厚度下,品质因子与 SiO_2 层厚度的变化关系,根据该图能够找到既可以把光场限制在较小区域内又能保持较长传输距离的结构。从数值上看:当 SiO_2 层的厚度为 120 nm 且 NaF 层的厚度为 40 nm 时,传输距离和归一化有效模场面积分别为 $178.12\ \mu\text{m}$ 和 0.3374;当 SiO_2 层的厚度为 40 nm 且 NaF 层的厚度为 10 nm 时,传输距离和归一化有效模场面积分布达到最小值 $73.27\ \mu\text{m}$ 和 0.1532。综上所述,通过对各个数值结果进行研究分析,最终可以获得一个 $200\text{ nm} \times 360\text{ nm}$ 的最优端面结构,其中 SiO_2 层的厚度为 120 nm, NaF 层的厚度为 40 nm, Si 层的厚度为 200 nm。在这样的最优端面结构下,传输距离

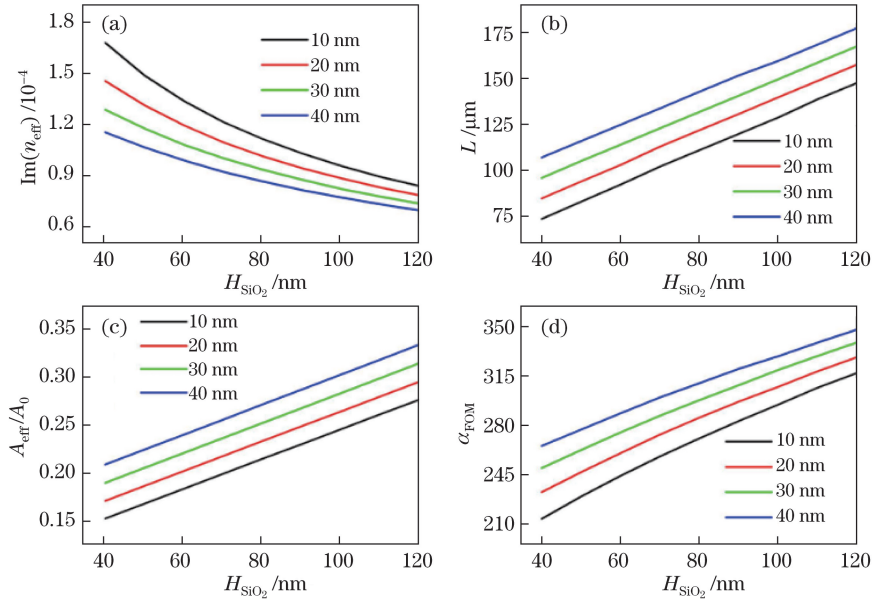


图3 不同 NaF 层厚度下, (a)有效折射率虚部、(b)传输距离、(c)归一化有效模场面积以及 (d)品质因子随 SiO₂层厚度的变化规律

Fig. 3 Change rule of $\text{Im}(n_{\text{eff}})$, L , A_{eff}/A_0 and α_{FOM} with thickness of SiO₂ layer at different thicknesses of NaF layer

和有效模场面积分别为 $178.12 \mu\text{m}^2$ 和 $0.203 \mu\text{m}^2$ 。可以看出,在同样亚波长级的模场限制下,该结构的传输距离比同类型杂化等离子激元波导的传输距离更长^[10,16-17,22]。

3 杂化布拉格光栅的设计与分析

第2节对 MWBG 的端面结构进行了设计与优化,确定了端面结构的基本尺寸,下面对 MWBG 进行设计与数值仿真分析。利用电子束光刻技术在 Si 层顶部沿 x 轴方向刻蚀出规则的起伏形结构(像一个个凹槽),如图 4(a)所示。 c 和 d 分别表示槽的宽度和深度。周期长度作为布拉格光栅的重要参数之一,需要满足光栅的相位匹配条件^[16,23],其表达式如下:

$$\Lambda = \frac{m\lambda_c}{2n_{\text{eff}}} = \frac{m\lambda_c}{n_{\text{eff1}} + n_{\text{eff2}}}, \quad (3)$$

式中 Λ 为光栅的周期长度; m 为光栅的阶数; λ_c 为中心波长或布拉格波长; n_{eff1} 和 n_{eff2} 分别是光栅凹凸所在位置截面的有效折射率,它们的平均数等于端面结构的有效折射率。为了使结构更为简单,槽宽 c 设定为 $\Lambda/2$ 。根据以上的研究可以发现,改变整个波导结构的高度可以影响整个结构的有效折射率。因此,为了获得光栅的周期长度,对 Si 层的上表面进行 z 轴方向上的刻蚀,刻蚀深度 d 设为 40 nm,以得到凹凸两个截面的有效折射率。为了保证被刻蚀与未被刻蚀的整体平均尺寸与之前确定

的最优端面结构尺寸一致($H_{\text{SiO}_2} = 120 \text{ nm}$, $H_{\text{NaF}} = 40 \text{ nm}$ 和 $H_{\text{Si}} = 200 \text{ nm}$),光栅凹槽所在部分的截面总高度为 340 nm。同理,凸起截面总高度为 380 nm。对凹凸截面进行数值仿真可以得知,在 1550 nm 波长下,二者的有效折射率分别为 1.1747 和 1.2561。因此,通过(3)式可以计算得出周期长度为 637.7 nm。这里,采用 60 个单元作为 MWBG 的周期数,可以确定沿 x 轴方向的光栅总长度($38.6 \mu\text{m}$)。

通过有限时域差分法(FDTD)对光栅进行仿真分析。在仿真过程中,模式光源的波长范围为 1450~1650 nm,其在光栅端面激励的模式如图 1(b)所示。为了防止光波未被完全吸收而对目标波长产生影响,选择了完美匹配层(PML)作为边界吸收条件。在网格划分方面,三个坐标维度分别设置了 $dx = 60 \text{ nm}$, $dy = 50 \text{ nm}$ 和 $dz = 20 \text{ nm}$ 的最大网格划分。同时考虑到金属材料的特殊性,在 Ag 和 SiO₂ 界面处设置了一个二次网格划分区域,其最大网格定义为 $dx = 30 \text{ nm}$, $dy = 20 \text{ nm}$ 和 $dz = 5 \text{ nm}$ 。经过数值模拟运算可以获得 MWBG 的电磁特性。在 xz 平面内,1550 nm 波长的归一化电场分布如图 4(b)所示。从图中可以发现,当光波由光栅端面进入后,经过不断地振荡耦合,1550 nm 光波被光栅反射回来。另外,传输过程中光场主要集中在 NaF 层传输,同样证实了 MWBG 对光场的亚波长限制能力。

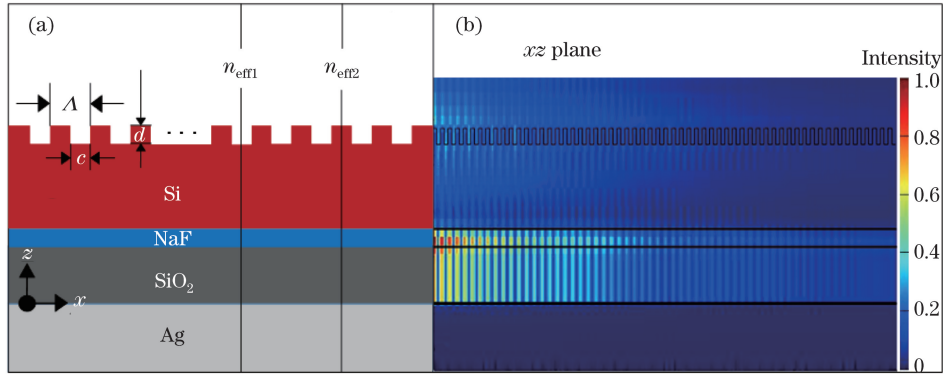


图 4 (a) xz 平面内 MWBG 布拉格光栅结构和 (b) 归一化电场分布

Fig. 4 (a) Structure of MWBG Bragg grating and (b) normalized electric field distribution in xz plane

根据耦合波理论和耦合模式方程^[24-25]对光栅的反射光谱特性进一步分析。反射率 R 和反射光谱带宽 $\Delta\lambda$ 可以由下列公式表示：

$$R = \left[\frac{-i\kappa \sin(sL')}{\gamma \cosh(sL') + i(\beta - \beta_c) \sinh(sL')} \right]^2, \quad (4)$$

$$s = \sqrt{|\kappa|^2 - (\beta - \beta_c)^2}, \quad (5)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_c^2}{\pi n_g} \sqrt{\kappa^2 + (\pi/L')^2}, \quad (6)$$

式中 γ 为失调量, κ 为耦合系数, L' 为光栅总长度, β 和 β_c 分别为某一波长处的传播常数和布拉格波长处的传播常数, n_g 为波导群的折射率。当耦合系数 κ 不变时, 在布拉格波长下, 光栅的反射率和反射光谱带宽与光栅的总长度相关。因此, 为了更好地观察光栅的反射滤波特性, 通过减少周期数制作了两个长度不同的布拉格光栅(单元数分别为 30 和 40, 相应的光栅总长度为 $19.36 \mu\text{m}$ 和 $25.78 \mu\text{m}$)。由于仅改变了周期数, 所以两个光栅的耦合系数是相同的。用同样的方法来计算其反射光谱, 并与所设计的布拉格光栅进行比较。如图 5 所示, 蓝线代表 60 个周期数的布拉格光栅反射谱, 红线代表 40 个周期数的布拉格光栅反射谱, 黑线代表 30 个周期数的布拉格光栅反射谱。从图中可以看出, 它们都是由中心反射区和多级旁瓣组成的, 并且关于 1550 nm 波长的中心线对称。不同之处在于, 图中蓝线的最高点即 MWBG 的最大反射率峰值达到了 71.9%, 说明所设计的光栅对 1550 nm 波长具有较强的反射效果, 明显高于其余两个布拉格光栅(62.0% 和 49.2%)。该反射区域的半峰全宽 (FWHM) 为 23.1 nm, 小于另外两个布拉格光栅(28.6 nm 和 34.8 nm)。由此说明, 光栅的总长度越长, 其反射率越高, 获得的带宽也越窄, 反映出了良好的反射滤波特性, 与耦合波理论相符合。

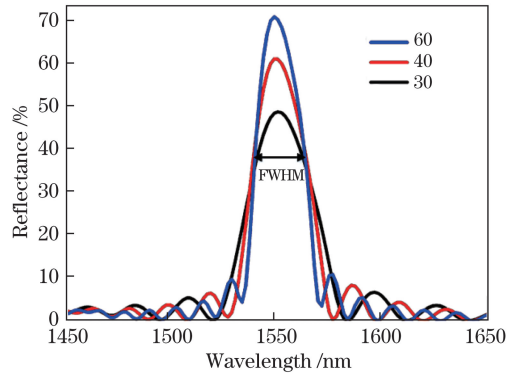


图 5 不同周期数 MWBG 布拉格光栅的反射光谱

Fig. 5 Reflection spectra of MWBG Bragg grating with different cycle numbers

4 结 论

提出了一种基于杂化表面等离子激元的双介质层多层波导布拉格光栅。通过基于有限元方法的仿真软件对其端面结构参数进行优化, 实验结果表明所提 MWBG 结构可以提供较强的电场约束, 同时也具有相对低的传播损耗(相对于其他杂化表面等离子激元波导器件, 可以支持 $178.12 \mu\text{m}$ 的传输距离)。此外, 基于良好的传输性能, 该 MWBG 在 1550 nm 通信波长下的反射率可以达到 71.9%, 并且其 FWHM 为 23.1 nm。光栅周期数对反射滤波特性也有非常重要的影响, 更多的周期数有助于提升波长的选择效果, 实现更窄的带宽。该 MWBG 有望成为与其他光子器件相兼容并具有实用性的光滤波器 and 光纤传感器。

参 考 文 献

- [1] Mu J, Huang W. A low-loss surface plasmonic Bragg grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(4): 436-439.

- [2] Liu C J, Yang C S, Lian L, *et al.* Cladding-modulation Bragg grating with asymmetric structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0505002.
刘春娟, 杨超山, 连乐, 等. 非对称包层调制型布拉格光栅[J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0505002.
- [3] Zhu T, Hu Y, Gatkine P, *et al.* Arbitrary on-chip optical filter using complex waveguide Bragg gratings[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(10): 101104.
- [4] Shi Z D, Zhao H F, Liu J L, *et al.* Design of a metallic waveguide all-optical switch based on surface plasmon polaritons[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0213001.
石振东, 赵海发, 刘建龙, 等. 基于表面等离激元的金属波导全光开关设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0213001.
- [5] Qu S, Song C, Xia X, *et al.* Detuned plasmonic Bragg grating sensor based on a defect metal-insulator-metal waveguide[J]. *Sensors*, 2016, 16(6): 784.
- [6] Shi W, Wang X, Lin C, *et al.* Silicon photonic grating-assisted, contra-directional couplers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 3633-3650.
- [7] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [8] Bian Y, Zheng Z, Zhao X, *et al.* Symmetric hybrid surface plasmon polariton waveguides for 3D photonic integration[J]. *Optical Express*, 2009, 17(23): 21320-21325.
- [9] Han Z, Forsberg E, He S. Surface plasmon Bragg gratings formed in metal-insulator-metal waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(2): 91-93.
- [10] Veronis G, Fan S. Guided subwavelength plasmonic mode supported by a slot in a thin metal film[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(24): 3359-3361.
- [11] Passaro V M N, Loiacono R, D'Amico G, *et al.* Design of Bragg grating sensors based on submicrometer optical rib waveguides in SOI[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(9): 1603-1611.
- [12] Wang X, Shi W, Grist S, *et al.* Narrow-band transmission filter using phase-shifted Bragg gratings in SOI waveguide[C]. *IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting*, 2011: 869-870.
- [13] Oulton R F, Sorger V J, Genov D, *et al.* A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(8): 496-500.
- [14] Dai D, He S. A silicon-based hybrid plasmonic waveguide with a metal cap for a nano-scale light confinement[J]. *Optics Express*, 2009, 17(19): 16646-16653.
- [15] Bian Y, Gong Q. Highly confined guiding of low-loss plasmon waves in hybrid metal-dielectric slot waveguides[J]. *Nanotechnology*, 2014, 25(34): 345201.
- [16] Xiao J, Liu J, Zheng Z, *et al.* Design and analysis of a nanostructure grating based on a hybrid plasmonic slot waveguide[J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(10): 105001.
- [17] Xiao J, Wei Q Q, Yang D G, *et al.* A CMOS-compatible hybrid plasmonic slot waveguide with enhanced field confinement[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2016, 37(4): 456-458.
- [18] Li H. Refractive index of alkali halides and its wavelength and temperature derivatives[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1980, 9(1): 161-290.
- [19] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review B*, 1972, 6(12): 4370-4379.
- [20] Chu H S, Li E P, Bai P, *et al.* Optical performance of single-mode hybrid dielectric-loaded plasmonic waveguide-based components[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(22): 221103.
- [21] Xiao-Li Y. Light guiding in a slot waveguide that includes an additional confining core region[J]. *Optics Express*, 2010, 18(6): 6408-6416.
- [22] Wu M, Han Z, Van V. Conductor-gap-silicon plasmonic waveguides and passive components at subwavelength scale[J]. *Optics Express*, 2010, 18(11): 11728-11736.
- [23] Mu J, Li X, Huang W P. Compact Bragg grating with embedded metallic nano-structures[J]. *Optics Express*, 2010, 18(15): 15893-15900.
- [24] Liao B Q, Zhao Q D, Feng D J, *et al.* Coupled-mode theory for optical fiber and its application to fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(11): 1340-1344.
廖帮全, 赵启大, 冯德军, 等. 光纤耦合模理论及其在光纤布拉格光栅上的应用[J]. *光学学报*, 2002, 22(11): 1340-1344.
- [25] Buus J, Amann M C, Blumenthal D. Tunable laser diodes and related optical sources[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005: 221-245.