

双层局部非对称光栅的偏振无关宽带反射

侯金 杨滨贤 杨春勇 陈少平

(中南民族大学 电子信息工程学院 智能无线通信湖北省重点实验 武汉 430074)

摘要 为了满足光通信与传感系统发展对光反射器的偏振和带宽的性能要求,将局部非对称光栅与正交串联反射排布方式相结合,实现了具有超宽反射带宽的偏振无关反射.首先,基于局部非对称结构,在 TM 模式下使得光栅的四个泄露模式能够分布在更宽的光谱上,从而实现了反射率大于 98% 的宽达 469 nm 的单偏振超宽带反射.其次,利用正交串联排布方式 90° 的旋转对称性,设计形成双层光栅反射,在反射率大于 97% 时获得了 492 nm 的偏振无关宽带反射.最后,对串联光栅之间的间距进行了探讨,结果表明:非对称串联光栅不仅在大间距和特定的小间距下能够实现宽谱偏振无关的反射,考虑间距的改变,还可应用于光滤波器和光传感器等方面.

关键词 亚波长光栅; 宽带反射器; 泄漏模共振

中图分类号 O436.3; TN241 文献标识码 A 文章编号 1672-4321(2019)03-0440-05

DOI 10.12130/znmzdk.20190322

引用格式 侯金 杨滨贤 杨春勇,等.双层局部非对称光栅的偏振无关宽带反射[J].中南民族大学学报(自然科学版) 2019,38(3): 440-444.

HOU Jin, YANG Binxian, YANG Chunyong, et al. Polarization-independent broadband reflection with two-layer locally asymmetric grating [J]. Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition), 2019, 38(3): 440-444.

Polarization-independent broadband reflection with two-layer locally asymmetric grating

HOU Jin, YANG Binxian, YANG Chunyong, CHEN Shaoping

(Hubei Key Laboratory of Intelligent Wireless Communications, College of Electronics and Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

Abstract In order to meet the demands of both polarization and bandwidth performance of the reflectors in optical communication and sensing systems, polarization-independent reflection with ultra-wide bandwidth is obtained by combining local asymmetric grating with orthogonal series arrangement. Firstly, based on the local asymmetric structure, the four leakage modes of the grating can be distributed over a wide spectrum in TM mode, which makes the local asymmetric grating have an ultra-wideband reflection of 469 nm with reflectivity greater than 98%. Secondly, making use of the 90° rotational symmetry in orthogonal series arrangement, the polarization-independent broadband reflection of 492 nm with reflectivity greater than 97% is obtained with an optimized bi-layer grating system. Finally, the spacing distance between the two series connection gratings are studied. It shows that asymmetric series gratings can not only achieve wide-spectrum polarization-independent reflection with both large spacing and specific small spacing distances, but also be applied to optical filters and optical sensors when changing the spacing distances.

Keywords subwavelength grating; broadband reflector; leakage mode resonance

反射器作为一种很常见的光学器件,在激光光源^[1]、光网络^[2]和监控传感^[3]等通信和传感系统中

均有着广泛的应用.为保证并提高传输容量和传感数量,光通信中一般对反射器的带宽、反射率和偏振等

收稿日期 2019-03-25

作者简介 侯金(1981-),男,教授,研究方向:光通信与光器件;E-mail: houjin@mail.scuec.edu.cn

基金项目 国家自然科学基金资助项目(11504435),中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CZY18001),国家自然科学基金委资助项目(201807780001)

方面有一定的性能要求.近年来,为了满足这些要求,亚波长光栅^[4]、光子晶体^[5]和超材料^[6]等多种方法被研究以获得高性能的反射器.其中,利用模式共振效应的亚波长光栅通过优化参数可以实现宽带反射,并具有体积小、可单片集成等优点^[7].在单层亚波长光栅中,多种一维^[8-10]或二维^[11-13]结构被用于设计宽带反射器.然而,在 TM 和 TE 泄漏模式共存的情况下会存在固有的低反射光谱位置^[14],这使得单层光栅在用于设计偏振无关反射器时难以更进一步实现超宽带反射.为将 TM 和 TE 泄露模式分离,双层光栅结构反射器在近年来被广泛研究^[7, 15, 16].ZHAO 等^[15]通过模拟正交堆叠双层一维光栅,在 1400~1600 nm 实现了高反射.但是该结构缺少支撑部件,在制作上具有很大的挑战.NIRAULA 等^[16]不仅通过串联两个正交的一维 TM 光栅实现了宽带偏振无关反射,并且利用类似的方法,在通信波段也实现了利于封装的宽带偏振无关反射器^[7].然而,在这种正交串联分布的双层反射器的设计中,仅考虑了对称结构光栅.最近有研究^[8, 9]表明,与对称结构光栅相比,非对称结构光栅在操控光栅的泄漏模式和实现宽谱响应等方面更具优势.若将非对称结构与正交串联分布方式相结合,或许能进一步提高反射器的偏振和带宽的性能.

因此,本文提出将局部非对称光栅与正交串联反射分布方式相结合,来提高反射器的偏振和带宽性能.要利用双层串联光栅的布置方式获得偏振无关的超宽谱反射,先决条件是要有在单偏振态下能够宽带反射的单层光栅.所以,在单一偏振下,首先研究了局部非对称光栅的反射特性和制作上的结构容差,并通过比较局部非对称光栅和常规对称结构光栅的光谱,阐明了局部非对称光栅获得宽带反射的原因.在此基础上,将两个局部非对称光栅进行正交串联排布,研究了双层非对称光栅的偏振和反射性能,发现串联分布不仅能获得偏振无关的反射,还能进一步增加反射的带宽.最后,为改善双层串联排布下整体反射结构尺寸较大的不足,分析了两光栅平板间距对反射性能的影响,并拓宽了双层正交串联局部非对称光栅的应用场景.

1 单层局部非对称光栅偏振反射器

按照前面的设计思想,要把局部非对称光栅与双层正交串联结合起来获得偏振无关超宽带反射,首先要设计出单偏振下具有超宽反射带宽的一维局部非对称光栅.这里,我们首先选取 TM 偏振态来进行研究.如图 1 所示,我们以典型的零折射率差光栅^[17]为

基础来构造局部非对称光栅.在厚度为 7 μm 的石英层上方,有 520 nm 厚的硅层,局部非对称光栅刻蚀在硅层上,刻蚀厚度为 h .局部非对称光栅的周期为 a ,一个周期中四部分占空比分别为 I_1 、 I_2 、 I_3 和 I_4 ,其中, I_1 和 I_3 为硅材料, I_2 和 I_4 为空气.硅的材料参数取自文献^[18]并通过 Hermite 插值法进行插值处理,石英的折射率取 1.51^[16].

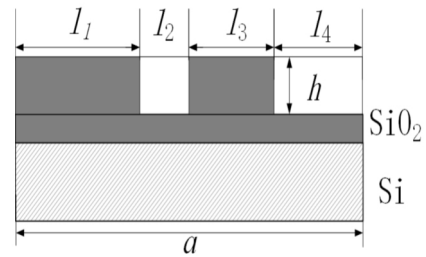


图 1 单层局部非对称光栅 TM 偏振反射器结构示意图

Fig.1 Structural diagram of TM polarized reflector with single-layer locally asymmetric grating

为了使图 1 的局部非对称光栅获得超宽带反射,采用粒子群优化算法的思想对其结构参数进行优化,规定适应度函数为反射率大于 98% 的连续波长个数.其中,光栅在各个波长下的反射率通过严格耦合波分析法(RCWA)^[19]计算获得.最终,优化结构参数如下:周期 a 为 1130 nm,刻蚀厚度 h 为 332 nm,占空比 I_1 到 I_4 依次为 0.327, 0.168, 0.333, 0.172,该结构对应的反射谱线如图 2 中带实心方块的粗实线所示.同时,为与优化的对称光栅(周期 560 nm,占空比 0.33,其他参数与非对称光栅参数一致)进行比较,将该对称光栅的反射谱线同样呈现在图 2 中,由无符号的粗实线表示.

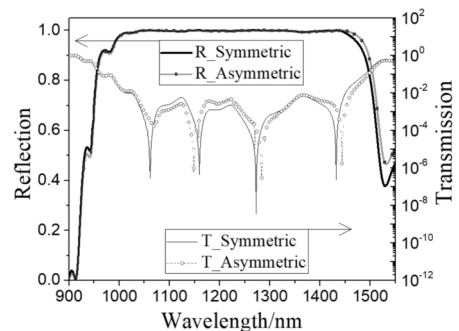


图 2 单层非对称光栅与单层对称光栅的 TM 偏振光谱对比

Fig.2 TM spectrum comparison of asymmetric grating and symmetric grating

在 1004~1473 nm 波段,局部非对称光栅反射器具有 469 nm 宽的宽带反射(反射率大于 98%),反射带宽与中心波长比 w 为 37.87%;优化的对称光栅反射器在 1003~1458 nm 波段具有 455 nm 的宽带反射

(反射率大于 98%) μ 为 36.97%.局部非对称光栅同对称光栅相比,带宽增加了 14 nm μ 增加了 0.9%(数值相减).两光栅的反射光谱较接近,这是由于在局部非对称光栅的设计中,仅通过小范围改变部分参数来实现非对称,能达到的非对称性较小,且局部非对称光栅仍具有周期性.

为探究局部非对称光栅反射器为何呈现更宽的宽谱反射,将非对称光栅和对称光栅对数坐标下的透射谱线也绘制在了图 2 中,分别由带空心圆符号的细虚线和无符号的细直线表示.对称光栅透射光谱和局部非对称光栅透射光谱均具有四个较为明显的透射

谷.这些具有透射谷的波长点上分别对应一个泄漏模式.四个泄漏模式共同作用,造成了两种光栅的高反射率及宽带反射特性.而与对称光栅中具有透射谷的波长点相比,局部非对称光栅中具有透射谷的波长点分布在更宽的波长范围内,分别在约 1050 nm、1150 nm、1275 nm 以及 1450 nm 附近.这是由于局部非对称光栅破坏了结构的对称性,操纵光栅中的泄露模式在更宽的波长上分布,同时又未造成宽谱反射带分裂,造成了局部非对称光栅具有比对称光栅更宽的宽带反射^[9].

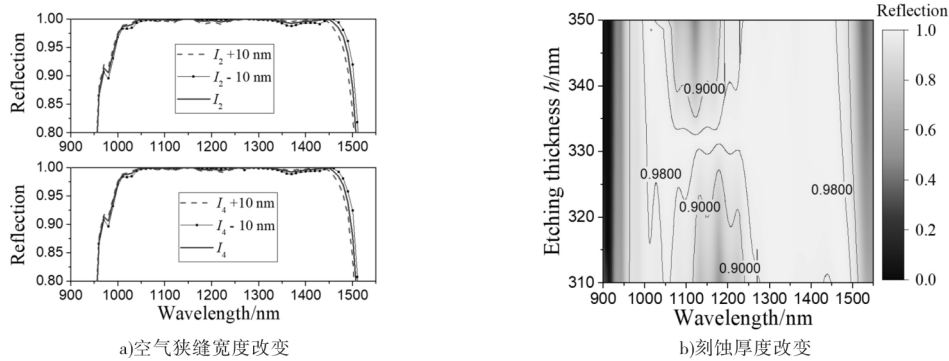


图 3 单层局部非对称光栅中空气狭缝宽度变化和刻蚀厚度变化对反射性能的影响

Fig.3 Effect of duty cycle I and etching thickness h on reflection of single layer locally asymmetric grating

对于单层的局部非对称光栅,除要求超宽的高反射效率之外,光栅的制作难度也值得注意.这将关系到器件成本的高低.为此,通过控制变量法,研究了局部非对称光栅中狭缝宽度和刻蚀厚度变化对反射效果的影响^[20].保持光栅周期不变,空气狭缝宽度改变时,仅其相邻光栅凸起宽度变化,两狭缝宽度偏移 10 nm^[21]对光栅反射谱的影响如图 3(a)所示.两个狭缝变化所得光谱形状基本一致,仅少数波长段略有不同.当非对称光栅的狭缝宽度变大时,反射光谱将向短波方向移动;反之,反射光谱向长波方向移动.这些现象的产生是由于狭缝宽度的改变使得光栅的有效折射率发生变化.局部非对称光栅的狭缝宽度在 20 nm 范围内变化时,绝大多数波长将会有超高的反射效率,这对于光栅的制作带来了方便.此外,如图 3(b)所示,当刻蚀厚度 h 在 40 nm 的大范围内变化时,光栅在 1250~1450 nm 波长范围将始终保持超高的反射率,而在较短波长处,随着偏移的增大,反射率将逐渐减少.当刻蚀厚度 h 在 332 nm 左右小幅度变化时,反射光谱的宽谱现象仍旧保持.在现有的刻蚀工艺中,刻蚀厚度相较于其他参数能够较为精确的控制,此处小幅的变化并不会对光栅的制作带来难度.综上所述,局部非对称光栅具备较好的制作容差.

2 双层偏振无关反射器

在第 1 部分中,通过研究与优化在 TM 偏振光下获得了具有超宽带反射光谱的局部非对称反射光栅.为了能够将单偏振光下的宽带反射拓展到非偏振光情况下,需要将 TM 偏振局部非对称反射光栅与 TE 偏振反射光栅串联排布.

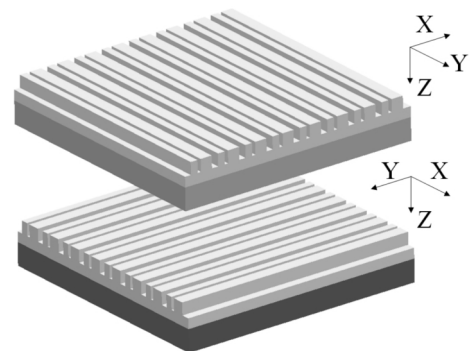


图 4 双层正交串联反射器模型示意图

Fig.4 Structural diagram of double-layer orthogonal tandem reflector

如图 4 所示,将上层 TM 偏振局部非对称光栅中心旋转 90°获得与其正交的下层光栅.当光垂直入射时,振动平面与光栅平面平行,由于 TE 偏振的振动方向(上层 Y 方向)和 TM 偏振的振动方向(上层 X 方

向) 互相垂直, 局部非对称光栅转动 90° 时将呈现 TE 偏振(下层 X 方向) 宽带反射. 一般情况下, 两个光栅平板的间距 D 应远大于波长的距离以避免两个光栅的渐逝波之间发生耦合.

由于双层结构反射器计算精度要求较高, 每个波长逐一计算将占据大量计算资源及时间. 所以, 首先采用简化计算方法^[7] 对双层串联光栅反射器的反射率进行计算, 具体如公式(1):

$$R_{total} = \frac{1}{2} \left\{ R_{TM} + R_{TE} + \frac{R_{TE}(1 - R_{TM})^2 + R_{TM}(1 - R_{TE})^2}{1 - R_{TM}R_{TE}} \right\}, \quad (1)$$

式中 R_{TM} 和 R_{TE} 分别为 TM 和 TE 偏振光下单层光栅的反射率. 将局部非对称光栅串联反射器的反射光谱同对称光栅串联反射器的光谱进行比较, 如图 5 所示. 局部非对称光栅串联反射器在 987~1479 nm 波长范围内, 实现了反射率大于 97% 的 492 nm 宽的反射带宽 μ 为 39.7%; 对称光栅串联反射器在 983~1465 nm 波长范围内, 实现了反射率大于 97% 的 480 nm 宽的反射带宽 μ 为 39.2%. 局部非对称光栅串联反射器同对称光栅相比, 带宽增加了 12 nm, μ 增加了 0.7% (数值相减). 考虑麦克斯韦方程的尺度不变效应, 同比增加光栅结构参数的尺寸, 该反射光栅的设计思想也可以用于获得 1550 nm 波段的超宽带偏振无关反射.

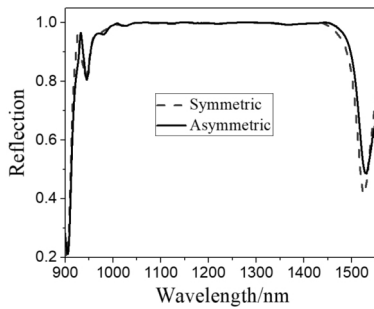


图 5 串联非对称光栅和串联对称光栅反射光谱
Fig.5 Reflectance spectra of double-layer reflectors

为进一步理解串联反射器实现偏振无关反射的原理, 将不同偏振下单层局部非对称光栅的反射光谱同双层串联局部非对称光栅反射器的光谱进行了对比分析. 如图 6 所示, 在不考虑法布里-珀罗谐振的情况下, 双层串联局部非对称光栅各波长的反射率基本为单层光栅两种偏振下反射率中的较大值. 这是由于两层光栅的距离足够远, 两个光栅附近的模场分布难以发生耦合.

由于串联光栅要求各层间的距离足够远, 使得器件的整体尺寸偏大, 这会使得该种类型的反射器应用范围受到限制. 为此, 简单计算了部分较近间距下串联

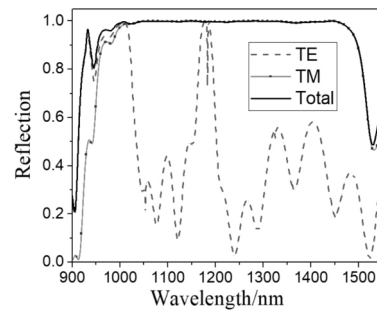


图 6 双层串联光栅和单层光栅的反射光谱

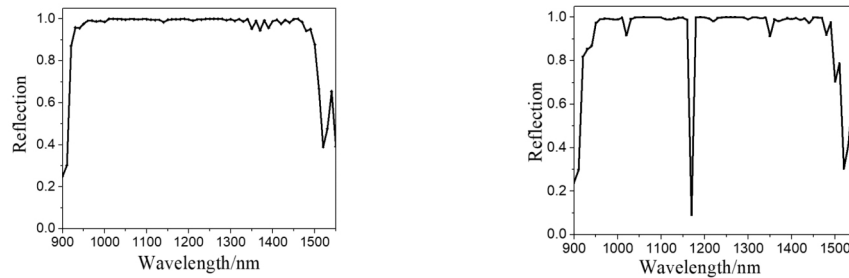
Fig.6 Reflection spectra of double-layer grating and single-layer grating
光栅的反射光谱. 如图 7(a) 所示, 当间距为 40 μm 时, 在 930~1490 nm 之间, 存在 560 nm 宽的反射率大于 94% 的反射带宽. 在该距离下, 虽然两个光栅平板的模场之间产生了耦合, 但在宽带反射波段, 并未出现较大的反射率起伏. 若能精确固定两平板的位置, 可极大减小串联光栅反射器的整体尺寸. 当间距为 30 μm 时, TM 偏振反射光谱在 1170 nm 波长处出现一个低反射点, 如图 7(b) 所示. 对比图 6 中单层光栅各偏振下该波长的反射率, 发现单独存在上层或下层光栅时该波长点均具有较高的反射率. 在两层光栅平板同时存在时, 该波长点的大部分光穿透了串联平板. 这是由于两层光栅平板的距离较近, 各光栅平板的模场产生耦合, 导致了量子隧穿效应^[22]. 利用该现象可以使得串联光栅方便地应用在光信号滤波和光传感等领域.

3 结语

将局部非对称光栅与串联反射排布方式相结合, 获得了超宽带的偏振无关反射. 这种反射中, 不仅由于非对称结构光栅的引入, 使得光栅泄露模式在更宽的光谱上分布, 造成了反射带宽比对称结构光栅增加, 还发现串联分布不仅能获得偏振无关的反射, 也能进一步增加反射的带宽. 具体来说, 对于局部非对称光栅, 不仅在单层 TM 模式下具有反射率大于 98%, 宽达 469 nm 的宽带反射(此时中心波长与反射带宽比为 37.87%), 而且在双层非偏振光下具有反射率大于 97%, 宽达 492 nm 的反射带宽(此时中心波长与反射带宽占比为 39.7%). 此外, 通过研究光栅空气狭缝宽度和刻蚀厚度对宽谱反射的影响, 证明了局部非对称光栅具有较好的制造容差. 最后, 本文还探讨了串联光栅间距对反射性能的影响, 发现在较近间距下, 改变间距, 既存在反射率大于 94% 的 560 nm 宽的反射带宽, 也会产生很尖锐的低反射谷. 综上所述, 这种反射配置不仅可用于薄膜太阳能电池底部反射、近红外传感器和 1310 nm 窗口光通信等方面, 而且当串联间距改变时,

双层光栅呈现的反射谷偏移特性,在滤波和传感等方面

面也具有很高的应用价值。



a) 双层间距 40 μm 下 TM 偏振反射光谱

b) 双层间距 30 μm 下非偏振反射光谱

图 7 典型较近间距下串联光栅的反射光谱

Fig.7 Reflective spectra of series gratings at relatively close spacing

参 考 文 献

- [1] LIU A, HOFMANN W, BIMBERG D. Two dimensional analysis of finite size high-contrast gratings for applications in VCSELs [J]. *Opt Express* 2014 22(10) : 11804-11811.
- [2] FANDIÑO J S, DOMÉNECH J D, MUÑOZ P. Two-port multimode interference reflectors based on aluminium mirrors in a thick SOI platform [J]. *Opt Express* ,2015 ,23(16) : 20219-20233.
- [3] 张振军 李敏. 一种 EPON 光缆在线监测系统 [J]. *现代电子技术* 2016 39(1) : 98-99.
- [4] DEMS M. Monolithichigh-contrast gratings: Why do they not scatter light? [J]. *J Lightwave Technol* ,2017 ,35 (2) : 159-165.
- [5] 张娟. 级联一维光子晶体全方位反射器的带宽最大化 [J]. *光子学报* 2014 43(10) : 40-45.
- [6] MOITRA P, SLOVICK B A, ZHI G Y, et al. Experimental demonstration of a broadband all-dielectric metamaterial perfect reflector [J]. *Appl Phys Lett* 2014 ,104(17) : 171102.
- [7] KO Y H, LEE K J, MAGNUSSON R. Experimental demonstration of wideband multimodule serial reflectors [J]. *Opt Express* 2017 25(8) : 8680-8689.
- [8] WU H, HUANG L, XIAO Y, et al. A wideband reflector realized by a subwavelength multi-subpart profile grating structure [J]. *J Opt* 2013 ,15(3) : 5703.
- [9] MAGNUSSON R, SHOKOOH-SAREMI M. Physical basis for wideband resonant reflectors [J]. *Opt Express* 2008 ,16(5) : 3456-3462.
- [10] WU H, XIAO Y, HUANG L, et al. Study on polarization independent broadband reflector based on multi-subpart profile resonant grating [J]. *Acta Optica Sin* ,2017 ,37(9) : 0913001.
- [11] KAUR H, KUMAR M. Two-way reflector based on two-dimensional sub-wavelength high-index contrast grating on SOI [J]. *Opt Commun* 2016 366: 266-270.
- [12] PROUST J, FEHREMBACH A L, BEDU F, et al. Optimized 2D array of thin silicon pillars for efficient antireflective coatings in the visible spectrum [J]. *Sci Rep* , 2016 6: 24947.
- [13] SHOKOOH-SAREMI M, MAGNUSSON R. Properties of two-dimensional resonant reflectors with zero-contrast gratings [J]. *Opt Lett* 2014 39(24) : 6958-6961.
- [14] KO Y H, SHOKOOH-SAREMI M, MAGNUSSON R. Modal processes in two-dimensional resonant reflectors and their correlation with spectra of one-dimensional equivalents [J]. *IEEE Photonics J* 2015 7(5) : 1-10.
- [15] ZHAO D, YANG C, MA Z, et al. Polarization independent broadband reflectors based on cross-stacked gratings [J]. *Opt Express* 2011 19(10) : 9050-9055.
- [16] NIRLAULA M, MAGNUSSON R. Unpolarized resonance grating reflectors with 44% fractional bandwidth [J]. *Opt Lett* 2016 41(11) : 2482-2585.
- [17] MAGNUSSON R. Wideband reflectors with zero-contrast gratings [J]. *Opt Lett* 2014 39(15) : 4337-4340.
- [18] GREEN M A. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300K including temperature coefficients [J]. *Sol Energ Mat Sol C* 2008 92(11) : 1305-1310.
- [19] LIU V, FAN S. S4 : A free electromagnetic solver for layered periodic structures [J]. *Comput Phys Commun*. 2012 , 183(10) : 2233-2244.
- [20] 钟志有 朱雅. 不同压强下制备镓-镁共掺杂氧化锌薄膜的性能研究 [J]. *中南民族大学学报(自然科学版)* 2019 , 38(1) : 107-111.
- [21] 吴华明 肖文波 肖永生 等. 偏振无关多齿谐振光栅反射镜的参数分析 [J]. *激光与光电子学进展* 2018 55(4) : 229-234.
- [22] SUH W, SOLGAARD O, FAN S. Displacement sensing using evanescent tunneling between guided resonances in photonic crystal slabs [J]. *J Appl Phys* ,2005 ,98(3) : 129-132.

(责任编辑 雷建云)