

文章编号 1004-924X(2015)06-1516-07

ITO/Ag 光子晶体薄膜的制备及性能

赵亚丽^{1,2*}, 马富花¹, 江波¹, 李克训¹, 张青翠¹, 魏学红^{2*}

(1. 中国电子科技集团公司第三十三研究所电磁防护技术山西省重点实验室, 山西太原 030006;

2. 山西大学化学化工学院, 山西太原 030006)

摘要:考虑材料的电磁屏蔽特性和可见光透过的矛盾,设计了以铝/氧化锡(Ag/ITO)为周期的光子晶体薄膜以实现电磁屏蔽和可见光透过的兼容。首先根据电磁屏蔽和可视的双重需求,优化了光子晶体的组份并对其性能进行了研究。接着采用磁控溅射方法制备了以 Ag/ITO 为周期的光子晶体薄膜,并对光子晶体薄膜的屏蔽和可见光透光率进行了测试和分析。实验结果表明:这种光子晶体薄膜在金属 Ag 总膜厚大于可见光趋肤深度而远小于微波波段趋肤深度时,在可见光波段的最高透光率高达 55%,而在微波 x 频率段的屏蔽性能最高可达 65 dB。通过结构设计,使薄膜的可见光透光率曲线与人眼的敏感曲线相吻合。随着每个周期 Ag 膜层的厚度增加,方阻相应降低,微波屏蔽性能相应提高。随着周期数的增加,薄膜的可见光透光率没有相应降低、屏蔽性能没有相应提高。设计的光子晶体薄膜在 30 MHz~18 GHz 较宽波段的屏蔽性能均大于 40 dB。这种设计方法为材料的电磁屏蔽和可见光透明兼容开辟了一条新的技术途径。

关键词:光子晶体;光子晶体薄膜;ITO/Ag 薄膜;电磁屏蔽;透明金属

中图分类号: O484.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152306.1516

Preparation and properties of ITO/Ag photonic crystal thin films

ZHAO Ya-li^{1,2*}, MA Fu-hua¹, JIANG Bo¹, LI Ke-xun¹, LI Bao-yi¹, WEI Xue-hong^{2*}

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Key Laboratory of Electromagnetic Protection Technology, The 33th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan 030006, China)

* Corresponding author, E-mail: yalizi12@163.com; xhwei@sxu.edu.cn

Abstract: As the shielding effectiveness and light transmittance of materials are conflict, this paper designs transparent shielding films based on the metallic photonic crystals with a period of Silver/Indium Tin Oxide(Ag/ITO) to realize the compatibility of the shielding effectiveness and the light transmittance. The composition of the photonic crystals was optimized and their properties were researched. Then, ITO/Ag periodic films were prepared by magnetron sputtering. Furthermore, the shielding, transmittance and electric conductivity of different structures were analyzed and tested. It is found that the maximum transmittance of the ITO/Ag periodic films at the visible band is up to 55% when the total thickness of Ag films is far more than optical skin depth and the maximum shielding of the ITO/Ag periodic films at microwave frequencies is up to 65 dB when the total thickness of Ag films is far less than the microwave skin depth. By structure design, the visible light transmittance

收稿日期: 2014-12-04; **修订日期:** 2015-01-16.

基金项目: 山西省青年科学基金资助项目(No. 2012021020-4, No. 2013021004-3, No. 2014021020-1); 山西大学预研基金资助项目(No. 201262401090404); 山西省自然科学基金资助项目(No. 2014011049-26)

curve of the samples is coincided with the human eye sensitivity curves. The square resistance decreases with each period of Ag film thickness increasing, correspondingly, the shielding increases. Moreover, the transmittance of the films does not decrease with numbers of periods and the shielding is not obviously changed. It realizes that the shielding is greater than 40 dB in the 30 MHz—18 GHz frequency ranges. The method proposed provides a new compatible approach to electromagnetic shielding and visible light transparent.

Key words: photonic crystal; photonic crystal thin film; ITO/Ag thin film; electromagnetic shielding; transparent metal

1 引言

随着电子技术的发展,电磁辐射对电子设备和人体的危害日益凸出,所以屏蔽电磁辐射显得尤为重要。传统的屏蔽方法主要采用诸如 Cu、Fe、Al 等金属来有效防止电磁辐射。但在电子设备显示屏、航天飞行器的窗口等领域,要求材料既具备电磁屏蔽的功能,又具有较高的可见光透光率,而传统的金属屏蔽材料都是不透明的。由此人们常采用 Ni、Cu 等金属网栅或氧化铟锡(ITO)等透明导电薄膜来实现电磁屏蔽和可见光透光的兼容^[1-2]。网栅型屏蔽窗虽然屏蔽性能较高,但比重大,会产生明显的莫尔条纹,影响图像及文字的观察效果,而且长时间观察容易产生疲劳;而薄膜型 ITO 屏蔽窗在可见光波段具有较高的透光性,但屏蔽性能相对较低,且在膜厚大于 300 nm 时不能通过提高膜厚来提高其屏蔽效能^[1]。金属复合薄膜的屏蔽性能优于单层 ITO 薄膜^[2-4],但金属膜层对可见光的反射和吸收制约了复合薄膜的总金属膜厚,这在一定程度地会限制金属复合薄膜的电磁屏蔽性能。

光子晶体因具有多重布拉格(Bragg)散射作用,在某些频率内使电磁波沿特定方向不能传播^[4-9],这一特性使它在光学领域具有良好的应用前景^[9-11]。单纯电介质材料的一维光子晶体可以用来作为全方向反射镜,但其全反射的频率范围有限。理论计算和试验研究的结果表明,通过在电介质光子晶体的介质层中插入金属层可以提高其全反射频率的范围。值得注意的是,可见光可以穿透含有总厚度上百纳米的金属光子晶体薄膜^[9-10],即实现了所谓的“透明金属”。目前,国外

研究主要集中在金属光子晶体的结构对其透光性能的影响,而关于其电磁屏蔽性能及应用的研究还较少,已有研究主要集中在金属插层成分、厚度和结构对其禁带的影响^[12-13],还有它作为宽带滤波器的设计及优化^[14]。本文通过优化光子晶体组份设计出一维金属电介质光子晶体——(ITO/Ag)^N/ITO,(其中 N 为周期数,ITO/Ag 为单元周期)。实验表明这种光子晶体薄膜的屏蔽性能和导电性可与金属相比拟,同时在可见光范围内具有良好的透光性能。这类金属光子晶体透明薄膜一方面解决了电磁屏蔽和可见光透过之间的矛盾,另一方面解决了导电性与可见光透过的矛盾,在电磁屏蔽可视窗口和透明电极等领域具有广阔的应用前景。

2 样品的制备与测试

采用磁控溅射在透明基底上沉积不同厚度的金属 Ag 膜层,ITO 薄膜,制成 ITO/Ag 光子晶体薄膜。其中磁控溅射仪为 SIV-500RD 型多靶磁控溅射仪,该系统在不破坏真空的条件下可连续沉积 36 层膜。将样品放置在可移动的小车上,通过控制小车的速率来控制膜层厚度,小车的速率精确控制到 1 mm/min。实验中,极限真空为 8.0×10^{-5} Pa,衬底为 500 mm × 400 mm × 1.1 mm 的浮法玻璃;分别采用 In₂O₃ : SnO₂ (质量比为 9 : 1)的陶瓷靶和 Ag(99.99%)靶材,靶材尺寸均为 127 mm × 610 mm × 6 mm。溅射 ITO 膜时,工作气体为 99.99% 的氩气和氧气,气流量分别为 50 mL/min 和 0.5 mL/min,溅射功率为 1 500 W。在室温下溅射 Ag 薄膜时,工作气体为 99.99% 的氩气,气流量为 50 mL/min,溅射功率

为 350 W。溅射 Ag 和 ITO 的工作气压均为 0.67 Pa。所制备的金属膜层、ITO 薄膜和 ITO/Ag 光子晶体薄膜的结构见表 1, 其中单层 ITO 膜层(3#)在 350 °C 下沉积, 其余样品均在室温下沉积。

实验采用日本 OTSUKA 型椭偏仪测量金属 Ag 薄膜的消光系数和各膜层厚度。通过沉积膜厚和小车速率计算得到金属 Ag 和 ITO 薄膜的生长速率分别为 18 nm·m/min 和 27 nm·m/min。采用 CN61M/KDY-1 型四探针电阻率/方阻测试仪(杭州新晖仪器有限公司)测量方块电阻, WGT-S 透光率/雾度测试仪(上海长方光学仪器有限公司)测量透光率, 透光率为 400~800 nm 波长的积分透光率。采用 TU-1810D 型紫外可见分光光度计(上海沪粤科学仪器有限公司)测试样品可见光透光率随波长的变化, 采用屏蔽室法(GB12190-90)来测试材料的屏蔽性能。屏蔽性能表示为:

$$S_p = A_1 - A_2, \quad (1)$$

其中: A_1 为无屏蔽室情况下, 在模拟场中检测仪器输出某一值时的衰减系数; A_2 为屏蔽室内检测仪器输出为 A_1 时衰减器的读数。测试窗口的尺寸为 295 mm×170 mm。

表 1 样品的参数
Tab. 1 Characteristics of test samples

样品	周期数	结构	ITO 膜厚	Ag 膜厚	总膜层厚
			/nm	/nm	度/nm
1#	/	Ag	/	5	5
2#	/	Ag	/	14	14
3#	/	Ag	/	22	22
4#	/	ITO	300	/	300
5#	3.5	(ITO/Ag) ³ /ITO	60	22	306
6#	4.5	(ITO/Ag) ⁴ /ITO	60	22	388
7#	3.5	(ITO/Ag) ³ /ITO	60	14	282
8#	4.5	(ITO/Ag) ⁴ /ITO	60	14	356
9#	5.5	(ITO/Ag) ⁵ /ITO	60	14	430

3 实验结果与讨论

3.1 金属光子晶体的组份设计

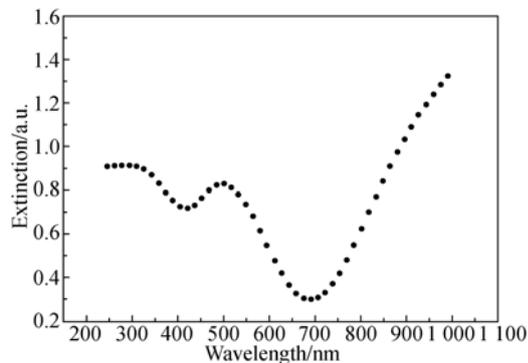
本部分主要阐述了金属光子晶体的金属和电

介质组份的优化过程。与 Cu、Al 和 Au 相比, 金属 Ag 膜在可见光波长范围内, 吸收率、反射率和介电常数的实部都较低, 因此 Ag 膜适合做可见光窗口。研究中选择金属 Ag 为光子晶体的金属组分。通过测试 Ag 膜的消光系数 k (见图 1(a)) 发现, 在可见光频段 k 最小, 而在大于 850 nm 波长后, k 明显增大。如式(2)所示, 消光系数 k 越大, 薄膜的吸收率越大。

$$\alpha = 4\pi k / \lambda_0, \quad (2)$$

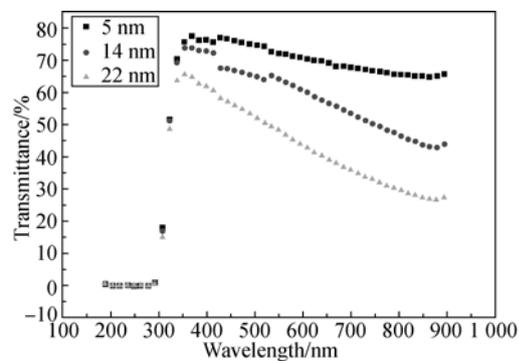
其中: α 表示吸收系数, k 为消光系数, λ_0 为电磁波在真空中的波长^[15-17]。根据公式(2)可推断 Ag 膜在可见光波段的吸收率最低。

另一方面 Ag 膜在波长低于 320 nm 时, 由于其带间跃迁, 透光率几乎为零, 如图 1(b)所示; 而在大于 850 nm 的波长范围内, 随着波长的增加, 其透光率明显降低, 反射率明显提高(见图 1(c))。随着 Ag 膜厚的增加, 透光率降低(见图 1(b)), 反射率却急剧增强(见图 1(c))。这一特性使金属薄膜的颜色为暗灰色, 视觉效果较差。



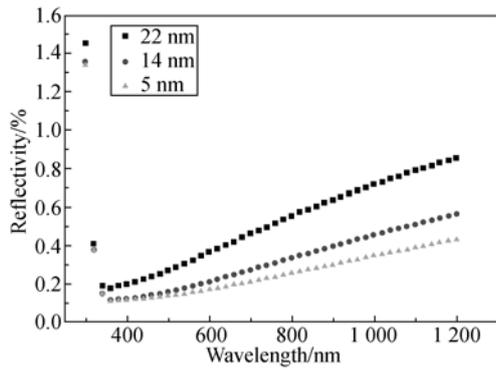
(a) 消光系数

(a) Extinction



(b) 透光率

(b) Transmittance



(c) 反射率

(c) Reflectivity

图 1 Ag 膜的性能

Fig. 1 Properties of Ag film

综上,Ag 薄膜的透明波段处于可见光频段。因此本文将 Ag 作为光子晶体的金属组分,在小于 320 nm 和大于 850 nm 的波长范围内,其通带被制约。利用这一特性,通过拓宽其禁带的宽度来提高屏蔽的波长范围。

与其它透明的导电薄膜相比,ITO 薄膜的可见光透光率较好、电阻较低,因此本文将 ITO 膜层作为金属电介质光子晶体的电介质组份。

3.2 ITO/Ag 光子晶体薄膜的性能

实验发现,当光子晶体薄膜周期由 1.5 增大到 2.5 时,随着周期数的增加,光子晶体薄膜的屏蔽性能提高,但和 ITO 薄膜相比却没有优势。因此,本文中光子晶体从 3 个周期起研究。当 ITO 膜厚大于 300 nm 时,屏蔽性能随波长的变化已不明显^[1],由此采用 300 nm 厚的 ITO 薄膜作为比较对象。其中 4#、5# 和 6# 样品的总膜厚分别为 300,306 和 388 nm。比较 4#~6# 样品的屏蔽性能(见图 2)发现,在膜厚和 ITO 薄膜相比拟的条件下,金属 Ag 光子晶体的屏蔽性能远大于单层 ITO 膜,特别是在 100 MHz 附近,Ag 光子晶体的屏蔽性能提高了 30 dB。在 200 MHz~18 GHz 频率内,其屏蔽性能提高了 20 dB。

根据式(3)^[10],在微波段 Ag 趋肤深度至少在微米量级。

$$\delta = (\mu\sigma f)^{-1/2}, \quad (3)$$

其中: δ 为趋肤深度, σ 为物体对应的电导率, f 为电磁波的频率, μ 和 π 分别为物理常数。由式(3)

可知,随着材料导电性能的降低,波长变长,其趋肤深度相应增加^[15]。

5# 和 6# 样品中 Ag 薄膜的总厚度分别为 66 和 88 nm,它们金属总膜厚远小于其微波波段的趋肤深度,但却表现为良好的屏蔽性能(见图 2),屏蔽性能最高达到 75 dB,反射率大于 99.99%。根据相关报道,金属光子晶体的反射率大于金属块体的反射率^[18]。由这一实验结论可知,较传统的金属屏蔽体,光子晶体屏蔽体大大降低了金属组分的厚度,在一定程度上降低了电磁屏蔽体材料的比重和厚度,顺应了电磁屏蔽材料质轻、超薄的发展趋势。

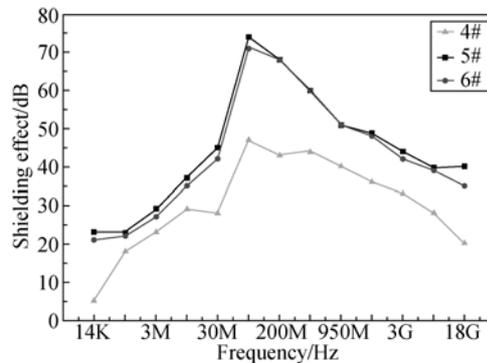


图 2 4#~6# 样品的屏蔽性能

Fig. 2 Shielding effects of 4#—6# samples

由于 Ag 膜在可见光的趋肤深度只有几十纳米,当单层 Ag 膜的膜厚大于 78 nm 时,可见光在 550 nm 的透光率小于 1%^[19]。而在本文中,Ag 膜的总厚度达到 66 和 88 nm,在可见光透光率仍然可达 37% 和 24% (见表 2)。和相同厚度的单层 Ag 膜相比,金属光子晶体在可见光的透光率提高了一个数量级。

表 2 5#、6# 样品的透光率和方阻

Tab. 2 Transmittances and resistances of 5# and 6# samples

样品	透光率/%	方阻/($\Omega \cdot \square^{-1}$)
5#	37	1.14
6#	24	1.27

比较 5# 和 6# 样品的方阻发现,其导电性并没有随着周期数的增加而提高。这和以往薄膜膜层之间的电阻是相互并联的理论是相互矛盾的。

值得注意的是,5#样品的透光率、屏蔽性能可与金属网型相比拟,但样品的比重和厚度远远优于网栅型的屏蔽窗。

在可见光波长范围内,ITO薄膜的介电常数实部远大于金属Ag薄膜的介电常数,由此光子晶体能带结构主要取决于ITO薄膜,而Ag薄膜在可见光波长范围内的趋肤深度为20 nm左右。在此实验中,当Ag膜厚为22 nm时,ITO薄膜分别取40,60和80 nm。较含60 nm的ITO薄膜,含40 nm和80 nm的ITO薄膜光子晶体的可见光透光率明显恶化,因此ITO薄膜的厚度选取为60 nm。实验发现,随着金属膜层厚度的增加,其屏蔽效能相应提高,因此可通过调节光子晶体金属膜层厚度来有效控制其屏蔽效能。

为了论证这一点,将Ag层厚度由22 nm降到14 nm。实验发现此时其光子晶体薄膜颜色呈绿色,与人眼敏感曲线一致,可提高人眼的舒适度^[20],如图3所示。图3为7#~9#样品的可见光透光率曲线。其中7#~9#样品在人眼敏感度最大波长550 nm附近的透光率最大。由此可知,金属Ag光子晶体薄膜的颜色为绿色,人眼的舒适度较高,可作为电子设备的窗口。

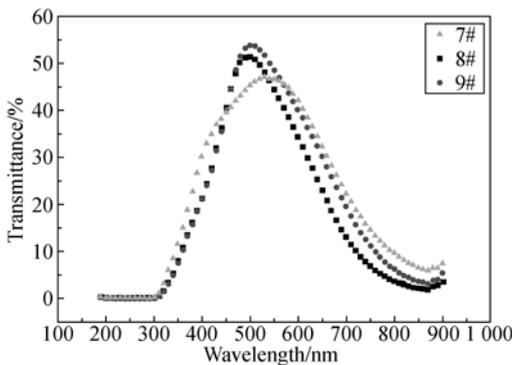


图3 7#~9#样品的透光率

Fig. 3 Transmittances of 7#—9# samples

比较7#~9#样品的透光率(见图3),9#样品的可见光透光率最高可达55%。随着周期数的增加,Ag总膜厚增加了14 nm,但透光率并没有相应降低,甚至在450 nm得到了相应的提高,最大可提高5%。7#~9#样品中金属膜层厚度依次为42,56和80 nm。金属膜的总厚度远大于其可见光的趋肤深度,仍可以保持良好的透光率,且随着金属膜总厚度的增加,透光率没有降低,这

是传统金属电磁屏蔽材料无法实现的。

比较7#~9#光子晶体的屏蔽性能(见图4)可知,和5#和6#样品一样,随着周期数的增加,金属光子晶体的屏蔽性能没有明显提高,但其屏蔽性能明显低于5#和6#。由此可见,通过提高单层金属膜层厚度可提高光子晶体薄膜的屏蔽性能。而在光子晶体周期大于3的条件下,通过提高光子晶体的周期数却不能提高光子晶体薄膜的屏蔽性能,这也在另一方面论证了光子晶体的屏蔽性能更多依赖于其光子晶体的周期结构。

比较5#和6#,7#,8#和9#样品发现,随着金属光子晶体周期数的增加,导电性没有明显的提高(见表2和表3)。5#和6#样品的方阻明显小于7#~9#样品。由此可见,随着每个周期Ag膜厚的增加,其导电性有了一定的提高。和Ag薄膜总膜厚相比,光子晶体材料的导电性更依赖于每个周期金属膜厚。综上,与光子晶体的周期数,金属总膜厚相比,金属光子晶体的导电性和屏蔽性能更依赖于金属膜层的厚度。

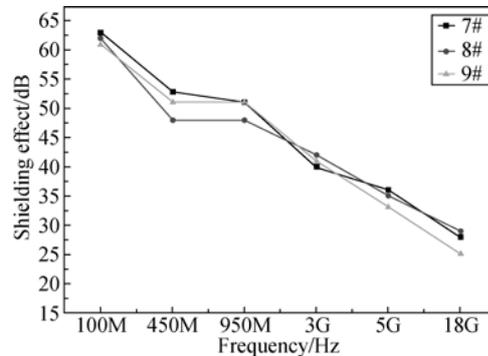


图4 7#~9#样品的屏蔽性能图

Fig. 4 Shielding effects of 7#—9# samples

表3 7#~9#样品的方阻

Tab. 3 Sheet resistances of 7#—9# samples
(Ω/\square)

样品	7#	8#	9#
方阻	2.74	1.94	2.31

4 结 论

本文根据金属光子晶体及其组份的特性,制备了一维金属光子晶体薄膜。该薄膜在30 MHz~18 GHz具有良好的屏蔽性能,在可见光波长

范围内具有良好的透光性,透光率最高可达55%,实现了透光和屏蔽的兼容。实验结果表明,在总金属膜厚远大于可见光趋肤深度时,光子晶体金属仍能保持良好的透光性能;在总膜厚远小于其微波波段的趋肤深度时,金属光子晶体具有良好的屏蔽性能。此外,金属光子晶体材料在可见光的透光率并没有随着金属膜层厚度的增加而降低,反而增加;通过调整光子晶体材料的结构,

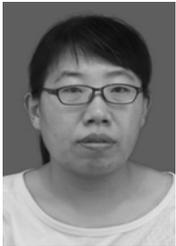
可使光子晶体材料的透光率曲线与人眼敏感曲线吻合,提高人眼的舒适度。随着周期中Ag膜层厚度的增加,光子晶体材料的导电性和屏蔽性能相应提高。而随着周期数的增加,光子晶体材料的导电性却没有明显提高,因此金属光子晶体材料的导电性和电磁屏蔽性能更依赖于金属膜层厚度。本研究为开发电磁屏蔽质轻、超薄的材料开辟了一条新的技术途径。

参考文献:

- [1] 赵亚丽,马富花,吕德涛,等.直流溅射ITO膜光电性能研究[J].应用化工,2013,42(4):634-636.
ZHAO Y L, MA F H, LÜ D T, *et al.*. Properties of ITO films prepared by DC magnetron sputtering [J]. *Appl. Chem. Indus.*, 2013, 42(4): 634-636. (in Chinese)
- [2] LZUMI H, ISHIHARA T, YOSHIOKA H, *et al.*. Electrical properties of crystalline ITO films prepared at room temperature by pulsed laser deposition on plastic substrates[J]. *Thin Solid Films*, 2002, 411(11): 32-35.
- [3] YABLONVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(3):2059-2062.
- [4] SMITH G B, NIKLASSON G A, JIKLASSON S E, *et al.*. Noble-metal-based transparent infrared reflectors: experiments and theoretical analysis for very thin gold films[J]. *J. Appl. Phys.*, 1986, 59(3):571-581.
- [5] KLOËPPEL A, KRIEGSEIS W, MEYER B K, *et al.*. Dependence of the electrical and optical behavior of ITO-silver-ITO multilayer on the silver properties [J]. *Thin Solid Films*, 2000, 365910:139-146.
- [6] BLOEMER M J, SCALORA M. Transmissive properties of Ag/MgF₂ photonic band gaps [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 72(14): 1676-1678.
- [7] 梁斌明,胡艾青,蒋强,等.光子晶体负折射效应在糖浓度检测中的应用[J].光学精密工程,2014,22(4):877-883.
LIANG B M, HU A Q, JIANG Q, *et al.*. Application of photonic crystal negative refraction effect to sugar solution concentration detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4):877-883. (in Chinese)
- [8] 陈胜钰,庄冬霞,强则焯,等.基于自准直效应的硅基光子晶体1×4光复用器[J].光学精密工程,2012,20(12):2626-2632.
CHEN SH Y, ZHUANG D X, QIANG Z X, *et al.*. 1×4 optical multiplexer based on self-collimation effect in silicon photonic crystals [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12):2626-2632. (in Chinese)
- [9] ULAGALANDHA P D, MOMCHIL M, MARIO T, *et al.*. High-Q silicon photonic crystal cavity for enhanced optical nonlinearities [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 105, 101101(10): 1-4.
- [10] KAZUYOSHI H, YONG L, YOSHITAKA K, *et al.*. Watt-class high-power, high-beam-quality photonic-crystal laser [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(3):406-411.
- [11] JOHNSON M T, SIRIANI D F, LEISHER P O, *et al.*. In-phase antiguided bottom-emitting vertical cavity laser arrays [J]. *Electron. Lett.*, 2013, 49(8):897-898.
- [12] KIM J, KWON M, LEE K, *et al.*. Enhanced light extraction from GaN-based green light-emitting diode with photonic crystal [J]. *App. Phys. Lett.*, 2007, 91(18):181109-1-3.
- [13] WIERER J J, DAVID J A, MEGENS M M. III-nitride photonic-crystal light-emitting diodes with high extraction efficiency [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(2):163-168.
- [14] 张金胜,张金龙,宁勇强,等.1555 nm 宽带滤光膜的设计及优化[J].中国光学,2013,6(4):557-562.
ZHANG J SH, ZHANG J L, NING Y Q, *et al.*. Design and optimization of 1555 nm broad-band-pass filter film [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 557-562. (in Chinese)
- [15] 高静,于峰,匡鸿深,等.纳秒声光调Q光纤激光器产生超连续谱[J].光学精密工程,2014,22(5):1138-1142.
GAO J, YU F, KUANG H SH, *et al.*. Generation of supercontinuum spectra from acousto-optic Q-switched nanosecond fiber laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5):1138-1142. (in Chinese)

- [16] 时光, 梅林, 张立超. 球面元件表面 AlF_3 薄膜的光学特性和微观结构表征[J]. 中国光学, 2013, 6(6):906-911.
SHI G, MEI L, ZHANG L CH. Characterization of optical and microstructural properties of thin films deposited on spherical element [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6):906-911. (in Chinese)
- [17] 申振峰. 特定折射率材料及光学薄膜制备[J]. 中国光学, 2013, 6(6):900-905.
SHEN ZH F. Preparation of specific refractive index material and optical thin films [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6):900-905. (in Chinese)
- [18] 方容川. 固体光谱学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
FANG R CH. *Solid State Spectroscopy* [M]. Hefei: University of Science and Technology China Press, 2003. (in Chinese)
- [19] SCALORA M, BLOEMER M J, MANKA A S, et al. Transparent metallo-dielectric, one-dimensional, photo band-gap structure[J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, 83(10):2377-2383.
- [20] The Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) ISO/CIE 10527: Colorimetric Observers, ISO/CIE 10527; CIE Draft Standard DS 010. 2/E, 2001 [S]. Photometry—The CIE System of Physical Photometry.

作者简介:



赵亚丽(1981—), 女, 山西临汾人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事光电功能材料的研究。E-mail: yaliz12@163.com



魏学红(1966—), 男, 山西潞城人, 博士, 教授, 1993年于中国科学院兰州化学物理研究所获得博士学位, 主要从事精细化学品合成的研究。E-mail: xhwei@sxu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)