

# 基于金属光子晶体的透明屏蔽膜

赵亚丽<sup>1,2</sup> 李克训<sup>2</sup> 李旭峰<sup>3</sup> 张青翠<sup>2</sup> 马富花<sup>2</sup> 张德伟<sup>2</sup> 魏学红<sup>1</sup>

<sup>1</sup>山西大学化学化工学院, 山西 太原 030006

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>太原科技大学应用科学学院, 山西 太原 030024

**摘要** 金属网栅和氧化铟锡(ITO)等透明导电膜是实现电磁屏蔽和可视兼容的常用材料,但其屏蔽和可见光透射率受到了很大的限制。通过解决屏蔽、导电与可视性能相互制约的矛盾,可有效提高电磁屏蔽与可视性能的兼容性。为此,报道了一种金属光子晶体透明膜。采用磁控溅射制备了ITO/Ag为周期的金属光子晶体透明膜,研究了周期结构对样品屏蔽效能、透射率和方阻的影响。研究表明,随着单位周期金属膜厚的增加,可见光600~800 nm波段透射率降低10%以上,可见光透射光谱变窄。同时400~600 nm波长范围内透射率并没有随金属膜厚的增加而降低,甚至升高。随着单位周期金属膜厚增加,微波频段的屏蔽效能相应提高,方阻相应降低。实验证实:光子晶体膜的屏蔽效能与光子晶体中总金属膜厚不存在明确的因果关系,而是与“金属-电介质”的纳米周期结构相关。制备了一种屏蔽高达70 dB,方阻低达2.1  $\Omega$ ,透射率大于50%的光子晶体膜。

**关键词** 薄膜; 金属光子晶体; 屏蔽效能; 透射率; 方阻

中图分类号 O346.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0831001

## Transparent Shielding Film Based on the Metallic Photonic Crystal

Zhao Yali<sup>1,2</sup> Li Kexun<sup>2</sup> Li Xufeng<sup>3</sup> Zhang Qingcui<sup>2</sup> Ma Fuhua<sup>2</sup>  
Zhang Dewei<sup>2</sup> Wei Xuehong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemistry and Chemical Technology, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

<sup>2</sup>The Electromagnetic Protection Technology Key Laboratory of Shanxi, No.33 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

<sup>3</sup>School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

**Abstract** Shielding effectiveness and optical transmittance are conflict in the preparation process of electro magnetic (EM) shielding and transparent film by indium tin oxide (ITO) film and metal mesh. Thus the compatibility of shielding effectiveness and light transmittance can be improved by the solution of the conflict among metal shielding, conductive and transparent. Transparent shielding film based on the metallic photonic crystal is proposed and experimentally demonstrated. The ITO/Ag periodic structured metallic photonic crystal transparent film is prepared by magnetron sputtering. The influences of the shielding effectiveness(SE), optical transmittance and the sheet resistance on the samples are studied. With the increasing of unit cycle metal film thickness, optical light transmittance in 600~800 nm wavelength is reduced by more than 10%. At the same time, the optical transmission spectra becomes narrower. But the light transmittance in 400~600 nm wavelength does not decrease with the increasing of metal film thickness, and even increased. With the increase of metal film thickness, shielding effectiveness is improved in microwave, sheet resistance reduces. Through the experiment, a different conclusion is drawn that the photonic crystal film shielding effectiveness does not totally depend on photonic crystal metal

收稿日期: 2015-02-09; 收到修改稿日期: 2015-04-02

基金项目: 山西省青年科学基金(2012021020-4, 2014021020-1)、国防预先研究(201262401090404)、山西省自然科学基金(2014011049)

作者简介: 赵亚丽(1981—),女,博士研究生,主要从事光子晶体膜制备及性能方面的研究。E-mail: yaliz12@163.com

导师简介: 魏学红(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事精细化学品合成方面的研究。E-mail: xhwei@sxu.edu.cn

film thickness. The results show that the shielding effectiveness is as high as 70 dB, optical transmittance is greater than 50%, sheet resistance is lower to  $2.1 \Omega$ .

**Key words** thin films; photonic crystal of metal; shielding effectiveness; transmittance; sheet resistance

**OCIS codes** 100.6640; 310.3915; 240.0310; 240.6680; 260.3910

## 1 引 言

光子晶体的概念是由 Yablonovitch<sup>[1]</sup>和 John<sup>[2]</sup>在 1987 年各自独立提出的。众所周知,在半导体中电子由于受到按晶格排列的原子周期势场的作用,原子分立能级变为一系列的能带。在光子晶体中光子受到按晶格排列的散射体作用,光场的本征频率同样变为一系列能带<sup>[3-5]</sup>。金属光子晶体是以金属作为一个组元的光子晶体,金属在其中可以是连通的背景介质,也可以是不连通的散射体。金属强色散、光学波段负介电常数、光子晶体晶格缺陷等特性,使得金属光子晶体呈现许多奇特的现象,具有重大的应用价值<sup>[4-12]</sup>。单纯电介质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往往有限。理论计算和实验研究表明,通过在电介质光子晶体的介质层中插入金属层,可以提高全反射的频率范围。根据理论,电磁屏蔽和可见光透明、导电和可见光透明是相互矛盾的。这一矛盾在很大程度上制约着可视部位电磁防护和透明电极技术的发展。值得注意的是,可见光可以穿透含总厚度上百纳米金属的金属-电介质膜周期性结构<sup>[13-14]</sup>,即实现了“透明金属”。但这种透明金属的结构对其屏蔽效能(SE)和透射率的影响国内外研究还较少。目前研究主要集中在金属插层的成分、厚度和结构对其禁带的影响<sup>[8-9]</sup>。本课题组设计了一种一维金属电介质光子晶体——(ITO/Ag)<sup>N</sup>/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膜屏蔽效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。这种金属光子晶体透明膜在电磁防护和透明电极领域都具有广阔的应用前景。它一方面解决了电磁屏蔽和可见光透明相互制约,另一方面解决了导电性与可见光透明相互制约。本文研究了金属膜厚和周期数对金属光子晶体膜的透射率、屏蔽效能和导电性影响的物理机制,通过实验论证了光子晶体的屏蔽效能是取决于“金属-电介质”的纳米周期结构,而不是总金属膜厚和单位周期屏蔽效能的累加。

## 2 实 验

### 2.1 样品的制备

采用磁控溅射分层制备了以 ITO/Ag 为周期的一维光子晶体膜。采用日本进口的 SIV-500RD 型多靶磁控溅射仪,极限真空为  $8.0 \times 10^{-5}$  Pa。靶材分别为  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$  (质量比为 9:1) 的陶瓷和金属 Ag(99.99%) 靶,靶材规格为  $127 \text{ mm} \times 610 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ,衬底为  $500 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 1.1 \text{ mm}$  的浮法玻璃。

镀膜前,首先用洗涤剂除去衬底上的油垢,再用去离子水超声清洗,再在真空环境对玻璃进行  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  的烘烤,以达到清洗玻璃的目的。溅射前系统小车将衬底运到溅射腔进行溅射。通过控制小车速率来控制光子晶体各层膜厚。ITO 和 Ag 膜的溅射功率分别为  $1500 \text{ W}$  和  $350 \text{ W}$ 。本底真空为  $1.0 \times 10^{-3}$  Pa。工作气体为 99.99% 的氩气和氧气。制备的样品结构如图 1 所示,其在一个方向介电常数呈周期排布,其中  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  分别代表 ITO 和 Ag 膜的介电常数。样品的结构参数见表 1。

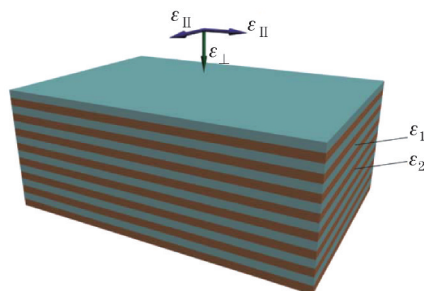


图 1 样品的结构图

Fig.1 Structure of samples

表 1 样品的参数

Table 1 Parameters of the samples

Samples	Parameter of samples
1#	ITO(60 nm)/Ag(4 nm)/ ITO(60 nm)/Ag(4 nm)/ ITO(60 nm)/Ag(4 nm)/ ITO(60 nm)
2#	ITO(60 nm)/Ag(6 nm)/ ITO(60 nm)/Ag(6 nm)/ ITO(60 nm)/Ag(6 nm)/ ITO(60 nm)
3#	ITO(60 nm)/Ag(8 nm)/ ITO(60 nm)/Ag(8 nm)/ ITO(60 nm)/Ag(8 nm)/ ITO(60 nm)
4#	ITO(60 nm)/Ag(22 nm)/ ITO(60 nm)
5#	ITO(60 nm)/Ag(22 nm)/ ITO(60 nm)/Ag(22 nm)/ ITO(60 nm)
6#	ITO(60 nm)/Ag(6 nm)/ ITO(60 nm)/Ag(22 nm)/ ITO(60 nm)/Ag(6 nm)/ ITO(60 nm)

## 2.2 样品的性能及表征

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;表格中的透射率采用 WGT-S 透射率/雾度测试仪(上海长方光学仪器有限公司)测量,其中透射率为波长从 400~800 nm 积分透射率。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)测试样品可见光透射率随波长变化情况;其中屏蔽效能是指采用板状、片状或网状的金属材料组成屏蔽体,将电磁辐射的作用和影响限定在一定的空间内,防止其传播与扩散的能力。屏蔽体产生的屏蔽效能见图 2 所示。 $E_1$  和  $E_2$  分别为屏蔽前和屏蔽后的场强。其屏蔽效能定义为

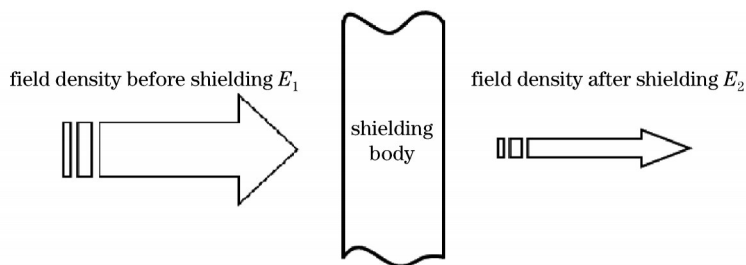


图 2 屏蔽体的屏蔽效能图

Fig.2 Shielding effectiveness of shielding body

$$SE(\text{dB}) = 20 \log_{10}(E_1/E_2). \quad (1)$$

实验中,采用了屏蔽室法(GB12190-90)来测试材料的屏蔽效能。在测试过程中利用射频与微波信号发生器(SMT02、SMR40)、频谱分析仪(E4440A)、双锥、对数以及喇叭天线(HK116、HL223、HF906)等仪器设备。材料的屏蔽效能为

$$SE(\text{dB}) = A_1 - A_2, \quad (2)$$

其中  $A_1$  为无屏蔽室情况下,在模拟场中检测仪器输出的为某一值时的衰减系数(dB);  $A_2$  为屏蔽室内,检测仪器输出为  $A_1$  时,衰减器的读数(dB),其测试窗口的大小为 295 mm×170 mm。

## 3 结果与讨论

### 3.1 单元金属膜厚对光子晶体性能的影响

#### 3.1.1 单元金属膜厚对光子晶体透光性能的影响

图 3 为单元周期金属膜不同的样品在可见光区的透射率。其中 1#、2#和 3#样品的单元周期的金属 Ag 膜厚分别为 4、6、8 nm,周期数为 3.5,每个周期中 ITO 膜厚为 60 nm。

由图 3 可得,当每层金属膜厚分别为 4、6、8 nm 时,光子晶体膜的透射率最大分别为 40%,47%,37%。可见光的透射曲线的宽度也会随着每层金属膜厚的增加而相应变窄。主要表现在 600~900 nm 波长范围内,随着每层金属膜厚的增加,其透射率明显降低。在波长 300~400 nm 波长范围内,1#~3#样品的透射率一致性较好。在波长为 700 nm 时,随着每层金属膜厚的增加,其透射率从 35%下降到 10%左右。

首先论述单元周期金属膜厚对 400~600 nm 的波长范围内对可见光的影响。分析其金属光子晶体的透射率一方面依赖于光子晶体的整体结构,另一方面取决于光子晶体的组份的性能。从光子晶体能带结构分

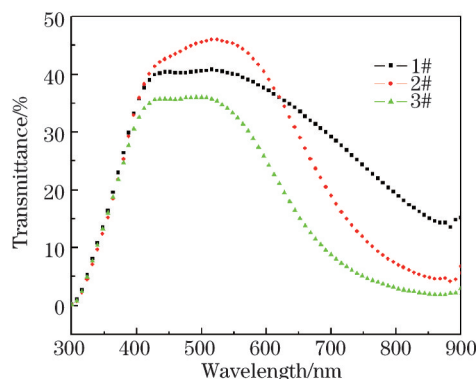


图3 1#、2#和3#样品的可见光区透射率

Fig.3 Visible light transmittance curve of samples from 1# to 3#

析。一维光子晶体禁带的基频  $\omega_0$  (即第一禁带的中心频率)<sup>[15]</sup>:

$$\begin{aligned} n_1 &= \sqrt{\varepsilon_1}, n_2 = \sqrt{\varepsilon_2}, \\ n &= (n_1 d_1 + n_2 d_2) / d, k_0 = \pi / d, \\ \omega_0 &= ck_0 / n = \frac{c\pi}{n_1 d_1 + n_2 d_2}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $n_1$  和  $n_2$  为光子晶体组分的折射率、 $d_1$  和  $d_2$  为光子晶体组份的膜厚、 $d$  为周期膜厚、 $\omega_0$  为禁带的第一中心频率、 $c$  为光速。在可见光波长范围内,ITO 膜层的折射率远大于金属 Ag 膜层的折射率<sup>[16]</sup>。同时 ITO 膜厚远大于金属 Ag 膜厚。根据(3)式,金属光子晶体的禁带的中心频率主要取决于 ITO 膜厚,而在能带边缘主要取决于其组分性能。在 1#~3# 样品中,ITO 膜厚是相同的,下面着重分析单元周期金属 Ag 膜厚对其可见光透射率的影响。金属 Ag 膜层的介电常数满足<sup>[17]</sup>:

$$\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon'' = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \Gamma^2} + i \frac{\omega_p^2 \Gamma}{\omega(\omega^2 + \Gamma^2)}, \quad (4)$$

其中  $\varepsilon$ 、 $\varepsilon'$  和  $\varepsilon''$  分别为 Ag 膜的介电常数、介电常数实部和虚部,  $\varepsilon_\infty$  为金属带间跃迁对介电常数贡献。在远离带间跃迁频率时,  $\varepsilon_\infty$  为常数,其中金属 Ag 的  $\varepsilon_\infty$  为 5。 $\omega$  和  $\omega_p$  分别为电磁波和等离子体频率,  $\Gamma$  为阻尼系数。金属 Ag 的吸收性能主要是由其介电常数的虚部  $\varepsilon''$  决定,  $\varepsilon''$  越大,其吸收特性越强。由于在可见光范围内,其电磁波的频率  $\omega$  远大于  $\Gamma$ , 因此通过(4)式,可得:

$$\varepsilon'' = i \frac{\omega_p^2 \Gamma}{\omega^3}. \quad (5)$$

通过(5)式可得,  $\Gamma$  越大,材料的吸收性能就越大。而  $\Gamma$  主要和电子的平均自由程有关。电子的自由程越小,  $\Gamma$  就越大<sup>[17]</sup>,进而吸收性能就越强:

其中  $v_F$  为费米速度,  $l$  为电子的平均自由程。

$$\Gamma = \frac{V_F}{l}. \quad (6)$$

当金属 Ag 膜厚只有几十个纳米时,电子的平均自由程  $l_1$  由于其尺寸效应而明显降低。和块体材料电子自由程  $l$  的关系为<sup>[17]</sup>

$$\frac{1}{l_1} = \frac{1}{l} + \frac{1}{R}, \quad (7)$$

其中  $R$  为纳米材料的尺度。根据(5)~(7)式发现,Ag 膜越薄,  $l_1$  就越小,阻尼系数  $\Gamma$  就越大,  $\varepsilon''$  就会相应增大,Ag 膜吸收性能就越强。根据以往实验分析,随着 Ag 膜的降低<sup>[18]</sup>,Ag 膜的粗糙度也会相应增大,这样也会在另外一个方面降低金属 Ag 膜电子的自由程,进而提高 Ag 膜的吸收性能。综上,随着金属膜厚的增加,对可见光吸收性能会相应降低。另一方面随着金属膜厚的增加,金属 Ag 膜对可见光的反射也会相应增强。通过以往对金属膜光学性质的研究,发现在可见光范围内,随着波长的增加,其反射性能也会相应增强(见图 4)。按照以上分析,1#~3# 样品的吸收依次降低,反射依次增强。金属 Ag 膜对其可见光透射率的影响是以

上两种物理机制相互竞争的结果。这样使得在波长 400~600 nm 波长范围内, 单元周期含 8 nm 金属膜的光子晶体膜反射占主导, 含 4 nm 的光子晶体膜吸收占主导。最终单元周期含 6 nm 的金属光子晶体膜的透射率最高, 含 4 nm 的次之, 而含 8 nm 的可见光透射率最低。

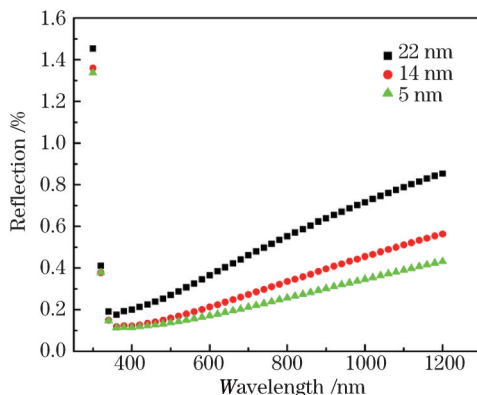


图4 不同金属膜厚反射率

Fig.4 Reflection of different film thicknesses

通过图 3 发现, 在波长 300~400 nm 之间, 可见光透射率一致性很好。这是因为这部分的吸收主要是由于金属 Ag 原子从 5 s 到 5 d 之间的带间跃迁<sup>[17]</sup>, 金属膜厚对其影响较小, 由此 1#~3# 样品在此波段可见光透射率取得较好的一致性。另一方面在波长大于 600 nm 时, 对其透射率的影响主要是金属膜的反射性, 金属膜层越厚, 反射性就越大。这样使得在此波段范围内, 单元周期含 8 nm 金属膜的光子晶体膜的透射率最低, 含 6 nm 的次之, 含 4 nm 的可见光透射率最高。

### 3.1.2 单元周期金属膜厚对光子晶体屏蔽效能的影响

图 5 为不同金属膜厚样品的屏蔽效能图。1#、2#、3# 样品的金属 Ag 膜厚分别为 4、6、8 nm, 周期数为 3.5, 每个周期 ITO 膜厚为 60 nm。

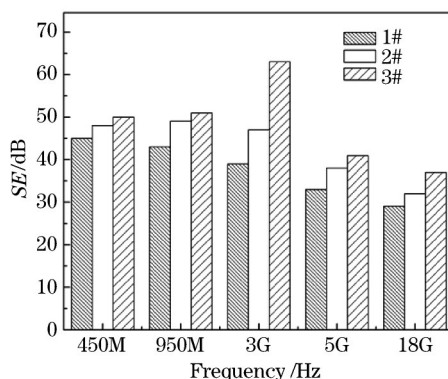


图5 1#、2#、3#样品的屏蔽效能

Fig.5 Shielding effectiveness of samples from 1# to 3#

由图 5 可见, 随着单元周期金属 Ag 膜厚的增加, 在 450 MHz~18 GHz 范围内, 各个频点的屏蔽效能都相应提高。当每层金属膜厚为 8 nm 时, 屏效最高可达 70 dB。在 450 MHz~18 GHz 频率范围内, 波长远大于光子晶体各层的膜厚。可以用等效介质理论来分析该频率范围内的电磁波与光子晶体相互作用。根据光子晶体的等效介质理论, 图 1 所示的一维光子晶体中其介电常数满足:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{1 + \eta}, \\ \frac{1}{\varepsilon_z} = \frac{1}{1 + \eta} \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{\eta}{\varepsilon_2} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $x$  和  $y$  分别代表平行于光子晶体表面任意垂直的两个方向,  $z$  为垂直于光子晶体表面的方向。  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  其分别代表 ITO 和金属 Ag 的介电常数<sup>[19-20]</sup>,  $\eta$  为两层电介质的厚度比:



$$\eta = \frac{d_2}{d_1} \tag{9}$$

当电磁波从空气入射到光子晶体表面时,会产生反射,其反射系数为<sup>[21]</sup>:

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \tag{10}$$

其中  $n$  和  $k$  分别为金属光子晶体膜的等效折射率和消光系数。当其等效折射率趋于 0 时,其光子晶体膜的反射率趋于 1。由于其 ITO 的介电常数  $\epsilon_1$  远远大于金属 Ag 的  $\epsilon_2$ , 这样使得金属 Ag 与 ITO 膜厚比对其等效折射率的影响更为突出。随着  $\eta$  的不断增大,其在  $Z$  方向的介电常数  $\epsilon_z$  趋于金属 Ag 的介电常数  $\epsilon_2$ , 其性能愈趋近于金属的性能。具体表现在随着金属膜层占空比的增加,一方面金属光子晶体膜屏蔽效能明显提高(见图 5);另一方面随着每层金属膜厚的增加,其导电性也明显提高(见表 2)。

表 2 1#、2#、3#样品的方阻

Table 2 Sheet resistance of samples from 1# to 3#

Samples	1#	2#	3#
Sheet resistance / $\Omega$	4.31	2.18	1.18

### 3.1.3 总金属膜厚对其屏蔽效能的影响

在报道中<sup>[11-12]</sup>,一方面认为光子晶体膜的屏蔽效能和导电性能取决于总金属膜厚;另一方面认为其屏蔽效能和导电性是光子晶体单位周期累计的一个结果。通过实验论证了以上论点的不正确性,一方面通过递增其周期数,论证周期数对其屏蔽效能的影响;另一方面通过在金属膜层较薄的光子晶体膜中插入较厚的金属膜层,来论证总金属膜厚对其屏蔽效能的影响。4#、5#、6#样品的屏蔽效能见图 6。4#和 5#样品中 Ag 和 ITO 膜厚分别为 22 nm 和 60 nm,周期数分别为 1.5 和 2.5,其金属总膜厚分别为 22 nm 和 44 nm。和 4#相比,5#样品的金属膜层数增加了 1 倍,屏蔽效能有一定的提高,但远远没有达到 4#的两倍。为了进一步说明光子晶体屏蔽效能和周期数的关系,制备了 3.5、4.5 和 5.5 等不同周期的光子晶体膜。发现当光子晶体周期数大于 3.5 后,其光子晶体的膜屏蔽效能并没有随着周期数的增加而明显提高。限于篇幅的限制,没有对此展开论述。这在实验上论证了其光子晶体屏蔽效能是单元周期屏蔽效能叠加效应是不正确的。也就是说当周期数达到一定程度时,通过提高光子晶体膜周期数来提高其屏蔽效能是不可行的。

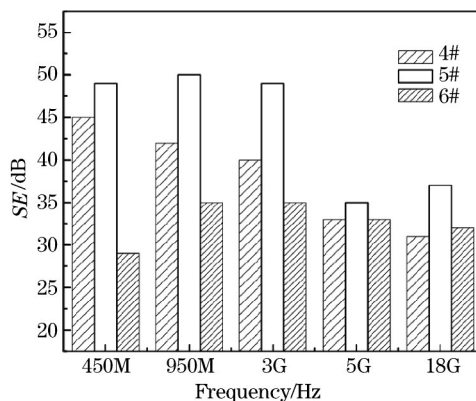


图 6 4#、5#、6#样品的屏蔽效能图

Fig.6 Shielding effectiveness of samples from 4# to 6#

另一方面,6#样品单元周期 Ag 和 ITO 膜厚分别为 6 nm 和 60 nm,周期数为 3.5。和 2#样品相比,其中间 6nm 的金属层被 22nm 的金属层所替代,形成含缺陷层的光子晶体膜。其结构为 ITO(60 nm)/Ag(6 nm)/ ITO (60 nm)/Ag(22 nm)/ ITO(60 nm)/Ag(6 nm)/ ITO(60 nm)。6#样品的总金属膜厚为 34 nm。

图 6 中 2#、4#和 6#样品的总金属 Ag 膜厚分别为 18、22、34 nm。和 2#样品相比,6#增加了中间周期金属膜厚,但其屏蔽效能没有相应提高。与 4#样品相比,6#在其两边增加了含 6 nm Ag 的两个周期,屏蔽效能也没有相应提高。综上,6#样品的总金属膜厚明显增加,但屏蔽效能并没有随着总金属膜厚的增加而相应提高,甚至降低。进一步论证了用屏蔽叠加理论解释光子晶体膜的屏蔽效能是不可行的。同时也说明了光子晶体的

屏蔽效能不完全取决于总金属膜厚,这和以往文献报道是不一致的<sup>[10]</sup>。5#样品在 18 GHz 的屏蔽效能明显优于除 3#外的其他样品。可见通过提高光子晶体单元周期的金属膜厚,可有效提高光子晶体膜的屏蔽效能。这和本节第一部分描述是一致的。

4 #~6#样品的透射率和方阻如表 3 所示。4 #和 5 #相比,随着周期数目增加,透射率和方阻相应降低。和 2#相比,6 #样品的方块电阻并没有随着单层金属膜层提高而相应降低,相反却从 2.18  $\Omega$  提高到 6.00  $\Omega$ 。这与膜层之间是并联电路是相互矛盾的。这是由于光子晶体膜的导电性是一个复杂过程,一方面取决于光子晶体膜每层膜的导电性,另一方面还和光子晶体膜之间的界面有较大的关系。

表 3 4 #、5 #、6#样品的透射率和方阻

Table 3 Light transmittance and Sheet resistance of samples from 4# to 6#

Samples	4 #	5 #	6 #
Transmittance /%	79.8	52.6	39.0
Sheet resistance / $\Omega$	3.54	2.06	6.00

## 4 结 论

设计一维金属光子晶体膜,在可见光区域具有良好的透光性,而在微波段具有良好的屏蔽效能,很好地实现了电磁屏蔽和可视的兼容。通过对一维金属光子晶体结构和性能关系的研究,得出以下结论:随着每层金属膜厚的增加,对可见光吸收性能降低,但反射性能却相应提高。这样使得随着金属膜厚的增加,光子晶体膜在 600~900 nm 的透射率急剧减小,而在 300~400 nm 透射变化很小,使得金属光子晶体在可见光透射谱线变窄。在光子晶体结构一定的情况下,随着每层金属膜厚的提高,屏蔽效能和导电性能相应提高。通过在光子晶体引入高厚度的金属缺陷层,以提高其屏蔽是不可行的,相反其屏蔽效能还会在一定程度上衰减。同时得出了和以往报道不一样的结论,即:光子晶体膜的屏蔽效能不完全取决于光子晶体金属膜厚,而取决于光子晶体膜的结构;另一方面光子晶体屏蔽效能不是单位周期累计的一个效果。通过结构设计,制备了低电阻(方块电阻小于 2.1  $\Omega$ ),透射率大于 50%,屏蔽效能最高可达 70 dB 的光子晶体膜。

## 参 考 文 献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(3): 2059-2061.
- 2 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- 3 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(4): 101101.
- 4 An Henan, Ouyang Zhengbiao, Xu Guiwen, *et al.*. The influences of the structure parameters of two-dimensional square photonic crystal on its photonic band gap properties[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(6): 842-846.  
安鹤男, 欧阳征标, 许桂雯, 等. 二维光子晶体结构参量对光子禁带特性的影响[J]. 光学学报, 2004, 24(6): 842-846.
- 5 Dastjerdi S R, Ghanaatshoar M, Hattori T. Design and analysis of superlens based on complex two-dimensional square lattice photonic crystal[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(10): 102303.
- 6 Siriani D, Leisher P, Leisher P O, *et al.*. In-phase antiguided bottom-emitting vertical cavity laser arrays[J]. Electron Lett, 2013, 49(14): 897-899.
- 7 Byeon K J, Hwang S Y, Lee H. Fabrication of two-dimensional photonic crystal patterns on GaN-based light-emitting diodes using thermally curable monomer-based nanoimprint lithography[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(9): 091106.
- 8 Kim Ja-Yeon, Kwon Min-Ki, Lee Ki-Sung, *et al.*. Enhanced light extraction from GaN-based green light-emitting diode with photonic crystal[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(8): 181109.
- 9 Wierer J J, David A, Megens M M. III-nitride photonic-crystal light-emitting diodes with high extraction efficiency[J]. Nature Photonics, 2009, 3(3): 163-169.
- 10 Chen Xuchong, Feng Shuai, Zhang Beibei, *et al.*. Sub wavelength imaging characteristics of near-infrared siliconbased metallic photonic crystal slabs[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0123003.  
陈胥冲, 冯 帅, 章贝贝, 等. 近红外波段硅基金属光子晶体平板亚波长成像特性[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0123003.
- 11 Yu Miao, Gao Jinsong, Xu Nianxi. Diffractive characteristics of optically transparent frequency selective surface[J]. Acta Optica

- Sinica, 2013, 33(8): 0831001.  
于 森, 高劲松, 徐念喜. 光学透明频率选择表面衍射特性[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0831001.
- 12 Yu Muxin, Zhou Wenchao, Wu Yihui. Mode analysis of unit cell superlens and study on its sub-wavelength imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1210001.  
余慕欣, 周文超, 吴一辉. 单元超透镜模式分析及其亚波长成像特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1210001.
- 13 Scalora M, Bloemer M J, Pethel A S. *et al.*. Transparent, metallo-dielectric, one-dimensional, photonic band-gap structure[J]. Appl Phys, 1998, 83(5): 2377-2383.
- 14 Bloemer M J, Scalora M. Transmissive properties of Ag / MgF<sub>2</sub> photonic band gaps[J], Appl Phys Lett, 1998, 72(14): 1676-1678.
- 15 Wang Hui, Li Yongping. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals[J]. Acta Phys Sin, 2001, 50(11): 2172-2178.  
王 辉, 李永平. 用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构[J]. 物理学报, 2001, 50(11): 2172-2178.
- 16 Palik E D. Handbook of Optical Constants of Solids(Vols II) [M]. New York: Academic Press, 1991: 45.
- 17 Cai W S, Vladimir S. Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications[M]. New York: Springer, 2010: 60.
- 18 Zhao Yali, Gao Fan, Wang Zhuangbing, *et al.*. Morphology and absorption of Ag-SiO<sub>2</sub> composite films[J]. Acta Phys Sin, 2007, 56(6): 528-533.  
赵亚丽, 高 帆, 王壮兵, 等. Ag-SiO<sub>2</sub>复合膜形貌和吸收特性的研究[J]. 物理学报, 2007, 56(6): 528-533.
- 19 Wood B, Pendry B D P Tsai. Directed subwavelength imaging using a layered metal-dielectric system[J]. Phys Rev B, 2006, 74(11): 115116.
- 20 Rytov S M. Electromagnetic properties of layered media[J]. Sov Phys JETP, 1955, 2(10): 466-471.
- 21 Ling Yiping. Thin Film Optics and Technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 70.  
林一平. 膜光学与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 70.

栏目编辑: 韩 峰