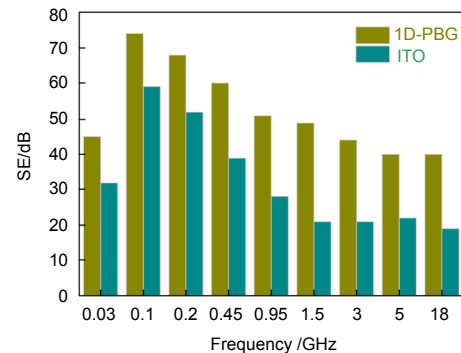


金属光子晶体薄膜可见光和微波波段传输性能

赵亚丽¹, 贾琨¹, 张晗¹, 马江将¹,
雷忆三¹, 明海^{2*}

¹ 中国电子科技集团公司第三十三研究所, 太原 030006; ² 中国科学技术大学光学与光学工程系, 合肥 230026



摘要: 一维金属光子晶体薄膜是由金属-介质多层结构组成的等效均匀的各向异性超构材料。相比单层金属膜层, 该结构在色散调控方面具有更多的自由度。在该结构中由于表面等离子体激元(SPP)的存在, 可实现倏逝波的定向传输。在本文中, 等效介质理论、时域有限元差分法(FDTD)的计算结果和实验结果都表明, 传输倏逝波的波长、频宽和强度可通过金属光子晶体结构调整实现主动设计。金属膜厚比例越小, 传输波长的中心和截止波长越长, 频带越宽。当金属膜层厚度小于 SPP 穿透深度时, 可获得宽频段的倏逝波的传输。同时, 对金属光子晶体在微波波段的传输性能也进行了研究, 发现其在微波波段等效介电常数为负, 具有良好的反射性能。该结构的屏蔽效能远大于厚度相近的 ITO 薄膜的电磁屏蔽效能。在厚度只有几百纳米时, 该结构即可实现良好的电磁屏蔽效能。通过金属光子晶体薄膜可实现电磁屏蔽材料的薄膜化、轻质化和可视化。

关键词: 金属光子晶体薄膜; 表面等离子体激元; 可见光透光率; 电磁屏蔽效能

中图分类号: O484.3

文献标志码: A

Transmission properties of metal photonic crystal films in visible light and microwave

Yali Zhao¹, Kun Jia¹, Han Zhang¹, Jiangjiang Ma¹, Yisan Lei¹ and Hai Ming^{2*}

¹ No.33 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan 030006, China; ² Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: The one-dimensional metallic photonic crystal film is an anisotropic metamaterial with an equivalent and uniform metal-medium multilayered structure. Compared with the single-layer metal film, the one-dimensional metal photonic crystal film has a higher degree of freedom in terms of chromatic dispersion regulation and control. With the existing of surface plasmon polariton (SPP), directional transmission of evanescent waves can be achieved. The experimental results and the calculated results of the equivalent medium theory and the finite-difference time domain (FDTD) method show that the active control on the wavelength, bandwidth and strength of the evanescent waves during transmitting can be realized by regulating the metal photonic crystal structure. The smaller is the ratio of metal film thickness, the longer are the center of the transmission wavelength and the cutoff wavelength, and the wider is the frequency band. When the thickness of the metal film layer is smaller than the penetration depth of the SPP, wide frequency-band evanescent waves can be transmitted. This paper also studied the transmission performance in the microwave band of the metal photonic crystal, finding that at the microwave band, the equivalent dielectric constant

收稿日期: 2016-10-09; 收到修改稿日期: 2016-12-27

*E-mail: minghai@ustc.edu.cn

of the metal photonic crystal is negative and the metallic photonic crystal has a good reflection property. Furthermore, the shielding effectiveness of the metal photonic crystal film is far better than the electromagnetic shielding effectiveness of the ITO film with the same thickness. Even at the thickness of a few hundred of nanometers, the metallic photonic crystal film can achieve good electromagnetic shielding effectiveness. Thus, by adopting the metallic photonic crystal film, light and visual electromagnetic shielding materials with thin films can be created.

Keywords: metallic photonic crystal film; surface plasmon; visible light transmittance; electromagnetic shielding effectiveness

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.02.013

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(2): 226–233

1 引言

金属光子晶体能够在亚波长尺度上有效控制和约束光的传输,呈现出诸多突破波的衍射理论限制的奇特的光传输现象^[1],在纳米光子器件、高密度集成电路、数据存储、纳米光刻等领域显示出巨大的应用潜力和发展前景。金属光子晶体超构材料可设计更符合实际应用要求的光子和电磁器件,因此近几年来倍受关注^[2-12]。本文研究的一维金属光子晶体薄膜,通过在透明介质上交替沉积电介质和金属薄膜,使其介电常数呈周期排布。该结构对“禁带”区域的电磁波是完全反射的,而对“通带”区域的电磁波完全透明^[13-14]。金属光子晶体的“禁带”和“通带”所在的频段由光子晶体组份、相对介电常数、相对膜厚、周期和周期数来决定。由此,可通过对光子晶体结构的调整,实现“禁带”和“通带”的任意调控。和电介质光子晶体相比,金属光子晶体只需要有限的几个周期即可产生明显的禁带,这使得金属光子晶体更有利于做反射器件^[13-14]。在金属光子晶体薄膜中,由于金属与电介质表面等离子体激元与入射光相互作用,使得金属光子晶体呈现出更为丰富的光学内涵。这种金属光子晶体薄膜也被称为双曲色散材料,其主要的特性是能够支持倏逝波的传输^[15]。金属光子晶体可见光通带和金属膜层厚度之间的关系可用耦合理论来分析。当金属厚度大于4倍SPP的穿透深度时,金属层两侧的SPP几乎不耦合;而当金属厚度为1~2倍SPP的穿透深度时,两侧SPP耦合较强。但金属薄膜较薄时,由于金属和电介质界面的表面等离子体激元(SPP)相互耦合,使得金属光子晶体在可见光区域出现“通带”,即在此区域具有良好的传输性能^[16-17]。1998年,Scalora提出了一种“透明金属”的金属光子晶体薄膜^[17],该薄膜总金属膜厚为10个可见光趋肤深度时,仍可以保持较高的可见光透光率。通过对金属光子晶体金属膜层厚度、

电介质膜厚、周期和周期数调整,可对金属光子晶体通过的可见光的中心波长和频率宽度实现有效的操控。

由于金属光子晶体具备较宽的表面等离子体带隙(plasmonic gap),可有效阻挡微波和红外辐射^[18]。这在很大程度上解决了微波电磁屏蔽和可见光传输相互制约的技术难题。通过该技术,有望实现可视电磁屏蔽材料的薄膜化和轻质化,打破了长期以来电磁屏蔽材料主要以金属块体材料存在的技术状态。光子晶体在可见光高传输和微波频段高电磁屏蔽的独特性能使其在透明部位电磁抗干扰领域具有广阔的应用前景,如人机界面的显示窗口,飞机、舰船窗口,保密会议室、电子考场、厂房等窗口及各类电子终端显示屏等方面;另一方面可应用到建筑和汽车等窗口,具有良好的隔热效果,起到节能减排的作用。以往金属光子晶体在可见光的增透机制主要是采用SPP模式的耦合理论来分析^[19],该理论分析过程较为复杂。本文采用金属光子晶体等效介质理论来研究金属光子晶体结构对可见光传输的影响规律,该理论较耦合理论具有更为直观和计算简单的优势。同时,本文对金属光子晶体在微波波段的反射性能也进行了研究,研究表明金属膜层厚度比例越大,金属光子晶体对微波的电磁屏蔽性能越强,但其电磁屏蔽性能并没有随金属光子晶体周期数的增加而明显增强。和含金属Au、Al的金属光子晶体相比,含Ag的金属光子晶体的可见光透光率最高^[18]。因此本文设计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)。同时为了提升金属光子晶体的SPP的耦合,选择每层Ag薄膜的厚度小于等于2个SPP的趋肤深度(20 nm)。本文采用时域有限元差分法(FDTD)研究了不同金属膜层和电介质膜层厚度对其金属光子晶体可见光透光率的影响规律^[20]。

2 理论指导

本文中设计的金属光子晶体结构如图 1 所示,其在垂直于衬底方向介电常数呈周期分布。

当金属光子晶体中每层膜厚远小于可见光波长时,金属光子晶体的介电常数满足等效介质理论^[21-23]:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_d + \eta \varepsilon_m}{1 + \eta}, \quad (1)$$

其中: ε_d 和 ε_m 分别代表 ITO 和 Ag 薄膜的介电常数; η 代表每层金属 Ag 膜厚(d_2)和 ITO 膜厚(d_1)的比值:

$$\eta = \frac{d_2}{d_1}. \quad (2)$$

ITO 薄膜的介电常数通过椭偏仪对制备的 100 nm 厚 ITO 薄膜测量获得,其大小为 3.13。金属的介电常数采用 Lorentz-Drude 方程获得,见式(3)^[23]:

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \Gamma^2} + i \frac{\omega_p^2 \Gamma}{\omega(\omega^2 + \Gamma^2)}, \quad (3)$$

其中: ε 、 ε' 和 ε'' 分别为 Ag 薄膜的介电常数、介电常数实部和虚部。而 ε_{∞} 为金属带间跃迁对介电常数的贡献。在远离带间跃迁频率时, ε_{∞} 为常数,其中金属 Ag 的 ε_{∞} 为 5^[23]。金属 Ag 薄膜的等离子频率 $\omega_p = 14.0 \times 10^{15}$ rad/s, 而阻尼系数 $\Gamma = 0.032 \times 10^{15}$ /s^[23]。采用等效介质理论,对含不同 Ag 和 ITO 膜厚比值的金属光子晶体薄膜的等效介电常数进行计算,见图 2 所示。由图 2 可得,随金属膜厚所占的比例降低,金属光子晶体等效等离子波长 λ_p 变长。当金属膜厚比例从 1:1 降低到 1:15 时, λ_p 从 380 nm 移到了可见光区域以外。在金属光子晶体薄膜中,对于波长大于 λ_p 区域的电磁

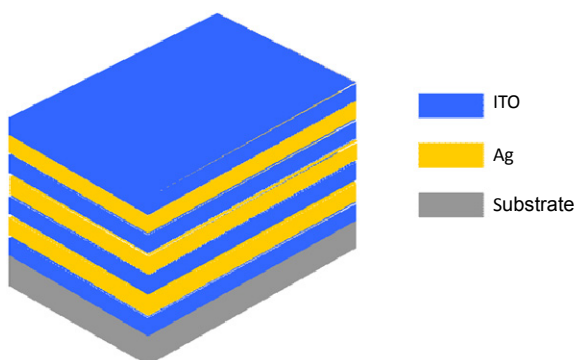


图 1 金属光子晶体薄膜的结构示意图。
Fig. 1 Structure of the metal-dielectric photonic films.

波,由于其等效介电常数小于 0,金属光子晶体对于这个频段的电磁波是不透明的,由此 λ_p 也被称为传输的截止波长。这一特征,使得金属薄膜对于波长大于 λ_p 的电磁波都为禁带,被称为等离子体禁带^[16]。这使得金属光子晶体比电介质光子晶体具有更宽的禁带。从图 2 可得,金属光子晶体在红外和微波区域都具有良好的反射性能。并且金属膜与介质膜厚度的比例越大,负的等效介电常数对应的绝对值越大,从而使得禁带宽度越大和禁带深度越深。由此可得,随着金属光子晶体中金属膜层厚度比例增大,金属光子晶体微波电磁屏蔽效能将相应地增加,而电磁屏蔽的频段也相应变宽。

另一方面随着金属膜层厚度比例降低,金属光子晶体在可见光波段的传输截止波长(λ_p)红移,同时等效介电常数大于 0 的可见光区域变宽。当等效介电常数 $\varepsilon_{\text{eff}}=1$ 时,由于阻抗匹配,金属光子晶体的反射率降到最低,可见光透光率将达到最大。此外,从图 2 可知,随金属膜层厚度比例的降低,金属光子晶体可见光波段透过的中心波长发生红移。综上,随金属膜层厚度比例的降低,金属光子晶体的中心波长和截止波长都发生红移,传输频带变宽。根据模式耦合理论,金属膜层厚度越小,该耦合系数越大,金属光子晶体的通带越宽^[16]。本文采用等效介质获得了与模式耦合理论相同的结论。通过等效介质理论,可对金属光子晶体的可见光透过中心波长、频带宽度和截止频率实现主动控制。通过增加金属光子晶体薄膜中金属组分,可提升其在微波波段的电磁屏蔽性能。

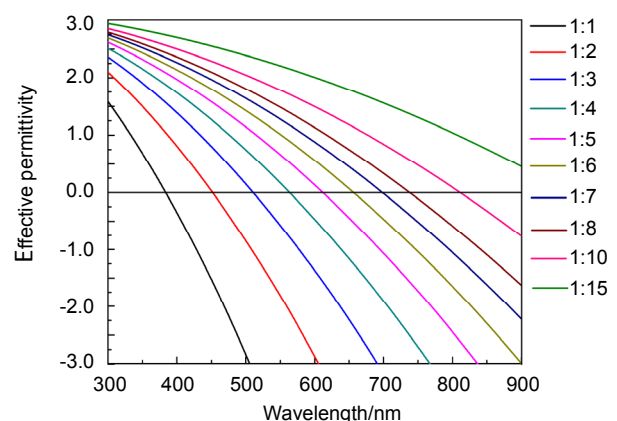


图 2 含不同金属 Ag 和 ITO 膜厚比例的等效介电常数。
Fig. 2 Calculated effective permittivity for different thickness ratios of Ag and ITO films.

3 实验结果

本文采用 FDTD 计算了不同金属膜层的光子晶体的可见光传输性能。其 ITO 和金属 Ag 薄膜的介电常数按照本文第 2 部分取值。采用日本进口的 SIV-500RD 型多靶磁控溅射仪分层制备一维金属光子晶体薄膜，其靶材分别为 $\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$ (w.t. 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。靶材与衬底的距离为 140 mm 。在沉积薄膜之前，首先用乙醇去除衬底上的油垢，然后用去离子水进行超声清洗，最后在真空环境对衬底进行 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 烘烤，以达到清洗玻璃的目的。该仪器的极限真空为 $8.0\times 10^{-5}\text{ Pa}$ 。分别采用射频和直流模式溅射 ITO 和 Ag 膜，溅射功率分别为 1500 W 和 350 W 。ITO 和 Ag 薄膜生长速率分别

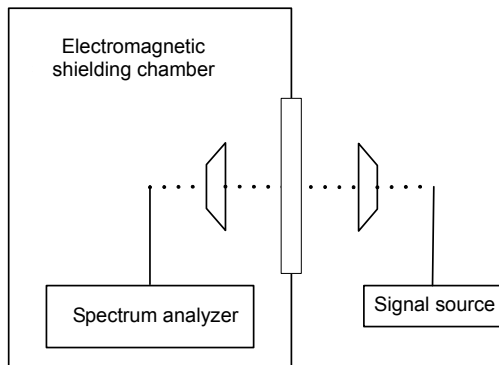


图 3 屏蔽室法测试材料屏蔽效能的方法。

Fig. 3 Method for testing shielding effectiveness by shielding chamber.

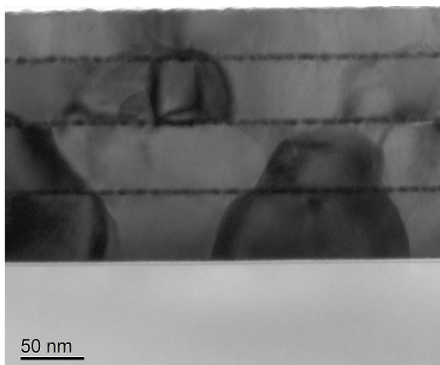


图 4 (ITO(60 nm)Ag(15 nm))³ITO(60 nm) 样品的 TEM 形貌图。

Fig. 4 TEM images of (ITO(60 nm)Ag(15 nm))³ITO(60 nm).

为 2.5 nm/s 和 2.0 nm/s 。本底真空为 $1.0\times 10^{-3}\text{ Pa}$ 。工作气体为 99.99% 的氩气和氧气。其溅射 ITO 薄膜的氩气和氧气的气流量分别为 50 sccm 和 1 sccm 。为避免金属 Ag 薄膜氧化，在单一氧氛围下溅射金属 Ag 薄膜，其气流量为 50 sccm 。为了提升金属光子晶体薄膜和衬底附着力和抗氧化能力，设计 ITO 膜为金属光子晶体最内层和最外层。同时，将沉积好的金属光子晶体薄膜在 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下真空退火 30 min 。

采用上海沪粤科学仪器有限公司的 TU-1810D 型紫外可见分光光度计测试样品可见光透光率随波长变化情况；采用 Bruker D8 的 X 射线衍射仪对金属光子晶体薄膜的结晶状况进行表征；采用 Tecnai G2 F20 S-TWIN 高分辨透射显微镜对金属光子晶体薄膜的横截面形貌进行表征；采用了屏蔽室法 (GB12190-90) 来测试材料的屏蔽效能。其测试方法见图 3 所示。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。

图 4 和图 5 分别为在 Si 片表面沉积的 (ITO(60 nm)Ag(15 nm))³ITO(60 nm) 样品 FETEM 和 XRD 图。从图 4 可看出金属光子晶体每层 Ag 膜厚变化较小。而 ITO 膜从底层到顶层膜厚却依次降低，到顶层时，ITO 膜厚只有 40 nm 左右。分析其主要原因是随膜厚的增加，金属 Ag 薄膜的三维生长模式，使得薄膜的粗糙度提高，从而降低了沉积在薄膜表面的 ITO 分子的迁移率，进而降低了 ITO 薄膜的生长速率。从图 4 中可看出 Ag 薄膜的粗糙度较大。这可能在一定程度上降低金属

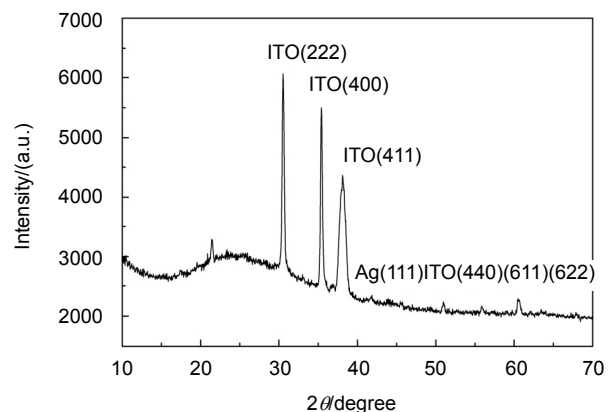


图 5 (ITO(60 nm)Ag(15 nm))³ITO(60 nm) 样品的 XRD 图。

Fig. 5 X-ray diffraction spectrum of (ITO(60 nm)Ag(15 nm))³ITO(60 nm).

光子晶体薄膜在可见光的透光率。在金属光子晶体薄膜的 XRD(图 5)中分别出现了 ITO 的(211)、(222)、(400)、(411)、(440)、(611)和(622)和 Ag 的(111)XRD 峰。这说明 ITO 和 Ag 膜的结晶型都较好。

4 数据分析

4.1 金属光子晶体薄膜可见光传输性能

图 6(a)、图 6(b)和图 6(c) 分别为采用 FDTD 对不同结构的金属光子晶体在可见光波段的传输性能的计算结果。本文在不作特殊说明的情况下,金属光子晶体的周期数都为 3.5 个周期。其中图 6(a)为每层 ITO 膜厚固定为 60 nm 时,在不同 Ag 膜层厚度的条件下,金属光子晶体薄膜的可见光透光率曲线。从图 6(a)可以看出,在相同 ITO 膜厚下,随每层金属膜层厚度的

降低,可见光透光率曲线变宽,中心波长和截止波长红移。这与第 2 部分理论分析是一致的。由此可见,采用等效介质理论研究金属光子晶体表面的 SPP 共振传输现象是可行的。同时,随金属膜层厚度降低,透光率相应提高,分析其主要原因是金属膜层较薄的光子晶体,在金属表面形成的 SPP 耦合效应较强,从而使得其可见光透光率相应提高。同样,当 ITO 膜厚为 40 nm 时,发现了和图 6(a)相同的规律。比较图 6(a)和图 6(b),发现在金属 Ag 膜厚相同的金属光子晶体中,含 40 nm 膜厚的 ITO 薄膜的金属光子晶体的可见光透光率明显降低。分析其主要原因是含 40 nm ITO 的光子晶体薄膜与入射光相互作用时,其金属层中的电场较强,导膜损耗较大的缘故。同时对金属 Ag 膜为 20 nm,而 ITO 薄膜为 20 nm, 40 nm, 60 nm, 80 nm

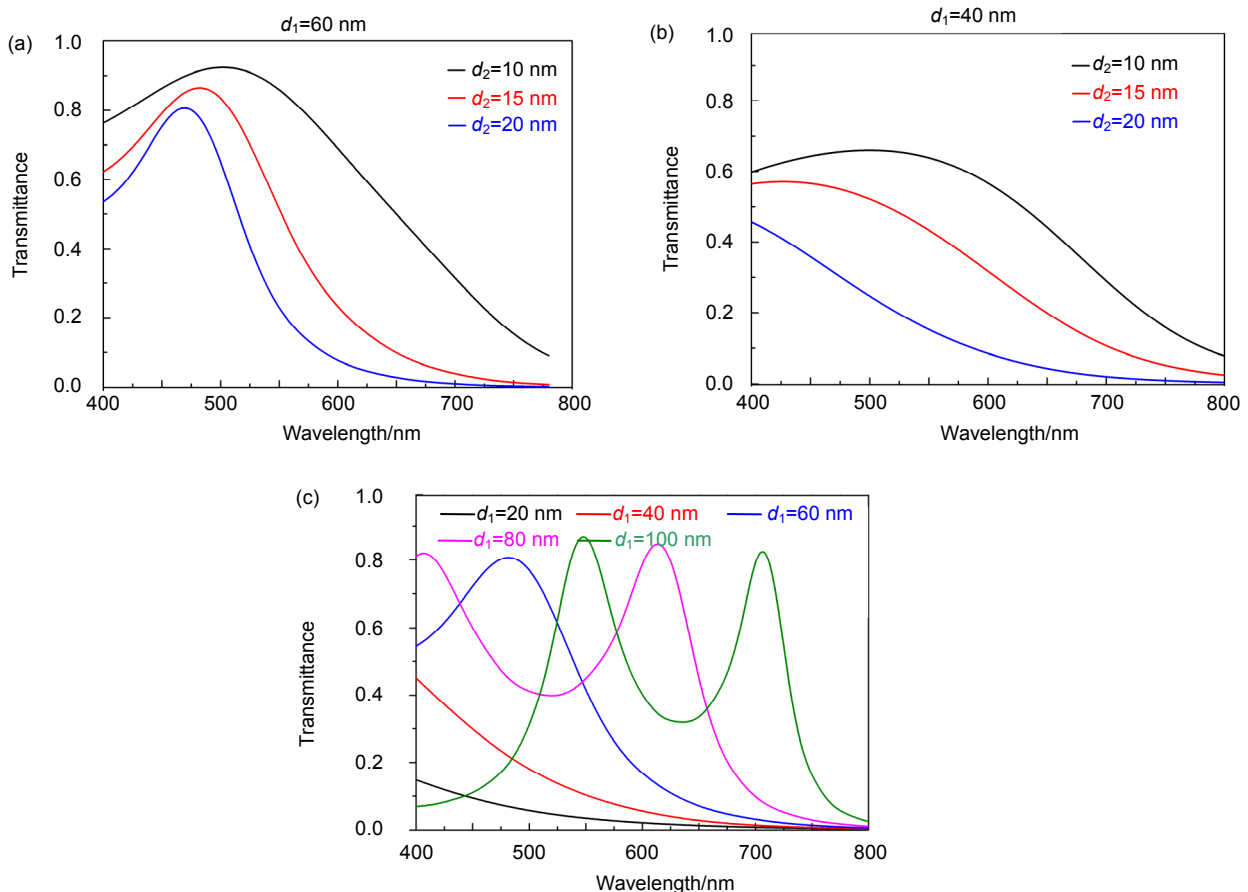


图 6 不同结构的金属光子晶体可见光透光率。(a) ITO 膜层厚度为 60 nm 时不同金属膜厚的可见光透光率。(b) ITO 膜层厚度为 40 nm 时,不同金属膜厚的可见光透光率。(c) Ag 膜厚为 20 nm,不同 ITO 膜层厚度下可见光透光率。

Fig. 6 Optical transmission spectra for samples with different structures. (a) Optical transmission spectra for samples with different thickness of Ag films and a fixed 60 nm ITO film. (b) Optical transmission spectra for samples with different thickness of Ag films and a fixed 40 nm ITO film. (c) Optical transmission spectra for samples with different thickness of ITO films and a fixed 20 nm Ag film.

和 100 nm 的金属光子晶体的可见光透光率也进行研究, 见图 6(c)。发现金属光子晶体随着金属膜厚比例的降低, 透光区域中心波长和截止波长红移, 透光率曲线变宽。当金属光子晶体 ITO 膜层厚度大于等于 80 nm 时, 其透光率曲线出现了两个透射峰。根据文献[23]分析, 其出现两个透射峰是较厚的电介质薄膜使得其两侧的 SPP 失去耦合而造成的。

另一方面对金属 Ag 膜厚为 4 nm、6 nm 和 8 nm, ITO 膜厚固定为 60 nm 的金属光子晶体薄膜的光学性能进行了研究, 如图 7。发现随金属膜厚比例的降低, 可见光透光率曲线的中心波长和截止波长红移, 频带变宽。这一结论和 FDTD 计算的结果是一致的。但 6 nm 厚 Ag 膜的金属光子晶体薄膜的透光率最高, 其次为含 4 nm 金属膜的光子晶体, 而含 8 nm 金属膜的光子晶体的可见光透光率最低。其主要原因是因为当金属膜厚低于 10 nm 时, 一方面随金属膜厚的增加, 金属反射率增强; 而另一方面, 随金属膜厚的降低, 其可见光的吸收急剧增强^[24]。在以上两种物理机制相互作用下, 含 6 nm 的 Ag 的金属光子晶体薄膜的可见光透光率最高。这一结论与其它文献是一致的, 即当相邻膜层厚度小于 SPP 的穿透深度时, SPPs 会相互耦合分裂成多个模式^[16]。如果模式的数量足够多且间距足够小时, 能够实现宽波段倏逝波放大, 从而实现宽频段可见光良好的传输。

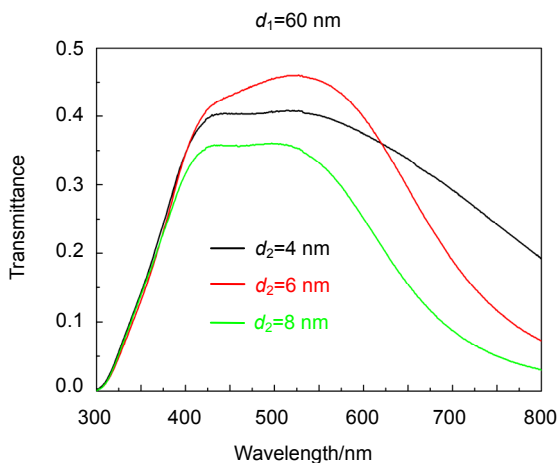


图 7 在 ITO 膜层厚度为 60 nm, 周期数为 3.5, 金属 Ag 膜厚为 4 nm、6 nm 和 8 nm 样品的可见光透光率。
Fig. 7 Optical transmission spectra for samples consisted of 3.5 pairs with 4 nm, 6 nm, 8 nm Ag films, respectively and a fixed 60 nm ITO film.

4.2 金属光子晶体薄膜电磁屏蔽性能

将 (ITO(60 nm)Ag(22 nm))³ITO(60 nm) 的金属光子晶体薄膜与 300 nm 厚的单层 ITO 薄膜相比, 其电磁屏蔽效能取得了显著的提高, 如图 8。特别是在 1.5 GHz, 电磁屏蔽效能从 20 dB 提高到了 50 dB 以上。从图中可以看出, 当电磁波频率为 100 MHz 时, 金属光子晶体薄膜的电磁屏蔽效能最高可达 70 dB 以上。此外, 根据以往的报道^[21], 金属光子晶体的反射性能远远优于含相同膜厚的单层金属膜层。其原因一方面是由于金属光子晶体在微波波段等效介电常数为负, 对微波波段不透明造成的; 另一方面是因为金属光子晶体薄膜的多层反射。

在每层 ITO 膜厚为 40 nm 时, 研究不同金属比例下金属光子晶体薄膜的电磁屏蔽效能。如图 9 所示, 在 ITO 膜层厚度一定下, 随金属膜层厚度比例的增加, 金属光子晶体在每个频点的电磁屏蔽效能都相应提高。这和本文的理论推测具有较高的一致性。随金属比例的增加, 金属光子晶体的禁带宽度变大, 禁带变深, 这使得金属光子晶体的屏蔽效能相应地提高。

单一金属为了实现良好的电磁屏蔽性能, 要求其金属的总厚度大于其对应波长的趋肤深度。其中趋肤深度 δ 的表达式见式(4):

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4)$$

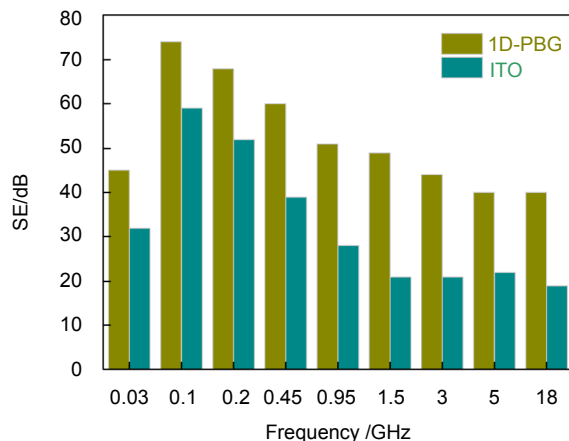


图 8 (ITO(60 nm)Ag(22 nm))³ITO(60 nm) 一维金属光子晶体薄膜(1D-PBG)及 300 nm 膜厚的 ITO 薄膜的电磁屏蔽性能。

Fig. 8 Electromagnetic shielding effectiveness for samples with structure of (ITO(60 nm)Ag(22 nm))³ITO(60 nm) and ITO films with a thickness of 300 nm.

其中: f 、 μ 和 σ 分别为对应电磁波的频率、金属的磁导率和电导率。根据式(4),对于金属 Ag 而言,在频率为 10 GHz 时,其趋肤深度为 $0.64 \mu\text{m}$ 。这使得金属电磁屏蔽材料都以块体形式存在。

从图 10 可以看出,当金属光子晶体薄膜的周期大于 3.5 时,随周期数的增加,金属光子晶体薄膜在各个频点的电磁屏蔽效能并没有明显提高,甚至在一定程度上还有所下降。由此可见,对于金属光子晶体薄膜,其周期数为 3.5 时已足以形成明显的禁带。同时通过对其它结构的金属光子晶体薄膜的电磁屏蔽性能的研究,我们也获得了相同的实验结论。由此可得,金属光子晶体薄膜膜厚在几百个纳米时就可获得良好的电磁屏蔽效能。这在一定程度上降低了电磁屏蔽材料的厚度,实现了电磁屏蔽材料的质轻和超薄的效果。

5 结论

本文设计了金属 Ag 和 ITO 组成的一维金属光子晶体薄膜,其每层金属 Ag 膜厚低于 2 倍 SPP 的穿透深度。通过金属光子晶体等效介质理论发现:对金属光子晶体结构的调整可实现其在可见光区域等效介电常数大于 0,而在微波波段等效介电常数为负。这使得金属光子晶体在可见光区域由于 SPP 耦合效应具有较高的传输性能,而在红外和微波频带范围内由于表面等离子体带隙存在,具有良好的反射性能。等效介质理论, FDTD 和实验结果都表明在金属光子晶体中金属组分比例越小,在可见光传输的截止波长和中心波长越长,传输频带越宽,在微波波段电磁屏蔽效能也会相应降低。本文的结果与 SPP 模式耦合理论的结

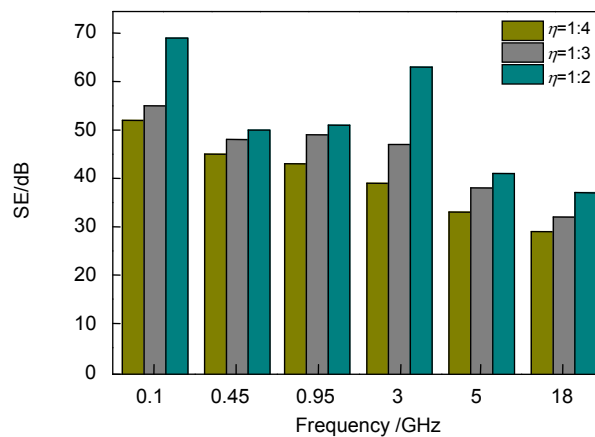


图 9 周期数为 3.5, 每层 ITO 膜厚为 40 nm 时, 在不同金属膜厚比例下金属光子晶体薄膜的电磁屏蔽性能。

Fig. 9 Electromagnetic shielding effectiveness for samples with 3.5 pairs of Ag/ITO consisted of different thickness ratio of Ag films, respectively and a fixed 40 nm ITO film.

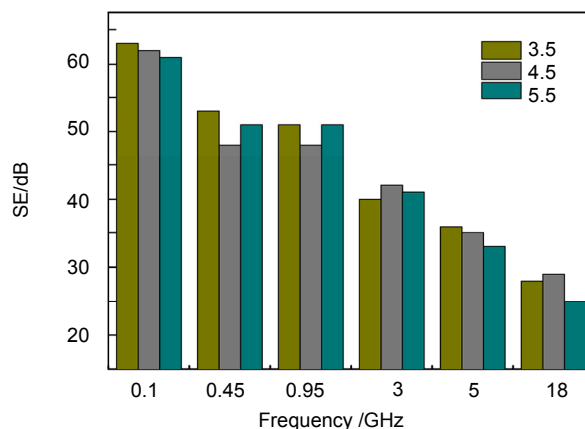


图 10 (ITO(60 nm)Ag(15 nm))ⁿITO(60 nm)型金属光子晶体薄膜 3.5、4.5 和 5.5 周期数下的电磁屏蔽效能。

Fig. 10 Electromagnetic shielding effectiveness of samples with 3.5, 4.5 and 5.5 pairs of (ITO(60 nm)Ag(15 nm))ⁿITO(60 nm), respectively.

论一致。通过该理论,可对金属光子晶体可见光传输性能和微波波段电磁屏蔽效能实现主动设计。另一方面,研究结果表明,金属膜层越薄,SPP耦合效应越强,可见光透光率越强;而金属膜层小于SPP穿透深度时,由于各模式间距较小,可获得宽频段的可见光传输。此外,当金属光子晶体的周期数为3.5时,足以形成良好的禁带。随周期数的进一步提高,金属光子晶体薄膜的屏蔽效能并没有相应的提高。综上所述,通过金属光子晶体薄膜不仅可以实现可见光高效率传输,同时实现了对可见光传输中心波长、截止波长和频带宽度的主动设计。采用金属光子晶体可实现电磁屏蔽材料的轻质化、薄膜化和可视化。这一独特的特点使得金属光子晶体在电磁屏蔽可视领域具有广阔的应用前景。

基金项目

国家国际科技合作专项资助项目(2014DFR10020)。

参考文献

- Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Review article surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2004, **424**(6950): 424–830.
- Jena S, Tokas R B, Sarkar P, et al. Omnidirectional photonic band gap in magnetron sputtered TiO₂/SiO₂ one dimensional photonic crystal[J]. *Thin Solid Films*, 2016, **599**: 138–144.
- Shen Huaizhong, Wang Zhanhua, Wu Yuxin, et al. One-dimensional photonic crystals: fabrication, responsiveness and emerging applications in 3D construction[J]. *RSC Advances*, 2015, **6**(6): 4505–4520.
- Moslemi F, Jamshidi-Ghaleh K. Electrically tunable optical bistability based on one-dimensional photonic crystals with nonlinear nanocomposite materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, **119**(9): 093101.
- Xiao Xing, Wang Wenjun, Li Shuhong, et al. Investigation of defect modes with Al₂O₃ and TiO₂ in one-dimensional photonic crystals[J]. *Optik*, 2015, **127**(1): 135–138.
- Degli-Eredi I, Sipe J E, Vermeulen N. TE-polarized graphene modes sustained by photonic crystal structures[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(9): 2076–2079.
- Luo Zhaoming, Chen Min, Deng Jiyuan, et al. Low-pass spatial filters with small angle-domain bandwidth based on one-dimensional metamaterial photonic crystals[J]. *Optik*, 2015, **127**(1): 259–262.
- Liu Yongqi, Qi Xinyuan, Lu Yang, et al. Observation of beam deflection in one-dimensional photonic lattice in LiNbO₃ crystal accompanied with self-focusing and self-defocusing nonlinearities[J]. *Physics Letters A*, 2016, **380**(1–2): 322–325.
- Xiao Xuyang, Chen Runping. Study of omnidirectional reflection bandgap extension in one-dimensional quasi-periodic metallic photonic crystal[J]. *Nano*, 2015, **10**(6): 1550088.
- Pavlichenko I, Broda E, Fukuda Y, et al. Bringing one-dimensional photonic crystals to a new light: an electrophotonic platform for chemical mass transport visualisation and cell monitoring[J]. *Materials Horizons*, 2015, **2**(3): 299–308.
- Yu Wenjuan, Jia Xu, Long Yongbing, et al. Highly efficient semitransparent polymer solar cells with color rendering index approaching 100 using one-dimensional photonic crystal[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, **7**(18): 9920–9928.
- Mandal S, Bose C, Bose M K. A generalized design of one dimensional photonic crystal based optical filter with lossy materials[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, **48**(3): 200.
- Aly A H, Ryu S W, Hsu H T, et al. THz transmittance in one-dimensional superconducting nanomaterial-dielectric superlattice[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, **113**(1): 382–384.
- Sigalas M M, Chan C T, Ho K M, et al. Metallic photonic band-gap materials[J]. *Physical Review B*, 1995, **52**(16): 11744–11751.
- Guo Yinghui, Pu Mingbo, Ma Xiaoliang, et al. Advances of dispersion-engineered metamaterials[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(1): 3–22.
郭迎辉, 蒲明博, 马晓亮, 等. 电磁超构材料色散调控研究进展[J]. *光电工程*, 2017, **44**(1): 3–22.
- Ye Weimin. Introduction of Photonic Crystals[M]. Beijing: Science Press, 2010: 233–234
叶卫民. 光子晶体导论[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 233–234.
- Scalora M, Bloemer M J, Pethel A S, et al. Transparent, metallo-dielectric, one-dimensional, photonic band-gap structures[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, **83**(5): 2377–2383.
- Aly A H, Ismaeel M, Abdel-Rahman E. Comparative study of the one dimensional dielectric and metallic photonic crystals[J]. *Optics and Photonics Journal*, 2012, **2**(2): 105–112.
- Ye Weimin. Introduction of Photonic Crystals[M]. Beijing: Science Press, 2010: 40.
叶卫民. 光子晶体导论[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 40.
- Oskooi A F, Roundy D, Ibanescu M, et al. MEEP: a flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method[J]. *Computer Physics Communications*, 2010, **181**(3): 687–702.
- Wood B, Pendry J B, Tsai D P. Directed subwavelength imaging using a layered metal-dielectric system[J]. *Physical Review B*, 2006, **74**(11): 115116.
- Belov P A, Hao Yang. Subwavelength imaging at optical frequencies using a transmission device formed by a periodic layered metal-dielectric structure operating in the canalization regime[J]. *Physical Review B*, 2006, **73**(11): 113110.
- Cai Wenshan, Shalaev V. Optical metamaterials: fundamentals and applications[M]. New York: Springer-Verlag, 2010: 123–136.
- Pradhan S K, Xiao Bo, Skuza J R, et al. Effects of dielectric thickness on optical behavior and tunability of one-dimensional Ag/SiO₂ multilayered metamaterials[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(10): 12486–12498.