

基于等离子体光学效应的调谐结构色器件发展及应用

梁冬冬 李绍军 李 阳 胡崔宸

(北方信息控制研究院集团有限公司, 江苏 南京 211153)

摘 要 表面等离子激元是一种在金属与介质交界面处发生的电子集群震荡, 是一种由入射光引起的表面电磁波, 其特点在于高度局域化。基于表面等离子激元实现对微纳光电器件的精准调控成为目前科研热点。本文聚焦在人工微纳结构的光谱调控器件最新进展, 综述通过设计不同的微纳结构, 改变结构参数, 材料属性, 机械拉伸柔性衬底等方法对光谱进行精准调控, 实现了结构色从静态到动态的调谐改进。可实时动态调谐的滤波器在军事、国防、信息安全等领域拥有广阔的应用前景。

关键词 表面等离子激元; 微纳光子器件; 人工微纳结构; 光谱调控; 器件设计

DEVELOPMENT AND APPLICATIONS OF TUNABLE STRUCTURAL COLOR DEVICES BASED ON PLASMONICS EFFECTS

LIANG Dongdong LI Shaojun LI Yang Hu Cuichen

(North Information Control Research Academy Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211153)

Abstract Surface plasmon is an electron cluster oscillation occurring at the interface between metal and medium. It is a surface electromagnetic wave caused by incident light and is characterized by high localization. The precise regulation of micro-nano-optical devices based on surface plasmon has become a hotspot. This paper focuses on the latest developments in spectral control devices for artificial micro-nano structure. It summarizes the accurate control of the spectrum by designing different nano-structures, changing structural parameters, material properties, and mechanically stretching flexible substrates, so as to realize the tuning improvement from static to dynamic. Filters that can be dynamically tuned in real time have broad application prospects in the fields of military, national defense, information security and other fields.

Key words surface plasmon; micro-nano photonic device; artificial nano-structure; spectral control; device design

众所周知, 大自然为人类的生存和发展提供了不可或缺且丰富多彩的资源, 光是其中最重要的资源之一。自然界中由于光的存在, 造就了色

彩的多样性。色彩可以通过很多机制产生, 大多数天然生物的着色都是通过染料色和结构色^[1]。染料色主要依赖于化学着色, 结构色通常通过特

收稿日期: 2021-01-24; 修回日期: 2021-04-18

作者简介: 梁冬冬, 男, 工程师, 研究方向为光学器件及应用, ldd1840@163.com。

引文格式: 梁冬冬, 李绍军, 李阳, 等. 基于等离子体光学效应的调谐结构色器件发展及应用[J]. 物理与工程, 2022, 32(2): 155-169.

Cite this article: LIANG D D, LI S J, LI Y, et al. Development and applications of tunable structural color devices based on plasmonics effects[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(2): 155-169. (in Chinese)

定的几何结构产生,利用周期光子纳米结构单元控制光的传输。自然界中结构色的产生机制给了人们很多启发,比如在长期的进化过程中,自然生物创造了许多可以形成结构色的光子纳米结构,总的来说有一维到三维不同的结构,具体结构中又有纳米光栅,多膜堆叠等不同的设计^[2-4]。一维光子纳米结构可以在一些昆虫^[5,6],鸟类^[7,8],鱼类,植物叶子中找到^[9]。二维的自然表面光栅可以用于抗反射,从而提高动物的视觉效率和减少不必要的反射,同时这些二维光栅拥有自清洁能力。除了光栅结构外,二维光子纳米结构还有周期性长纤维的形式。此外,天然宝石蛋白石亮丽的彩虹色是通过三维光子纳米结构产生^[10-11]。

通过对自然界的探索与发现,人类的科学技术一直在进步。从牛顿发现了光的色散,到如今可以自主设计光学器件来获取特定频率的光波,经过科研工作者的不懈努力,微纳光学器件已经有了长足的发展。利用光子或等离子共振原理研发的纳米结构展现出了新的光学特性,这种新颖的特征在相关的研究领域中展现出了巨大潜力,比如说,相关的近场探测器通过纳米结构设计能够实现超高分辨率的传感或者成像^[12-21]。此外吸波器也是一个研究方向,由于其特殊的吸收特性、独特的能量收集转换功能,吸波器可以投入到多种应用中,如光电探测器、热发射器和测辐射热计等^[22-28]。当然,微纳光学器件的研究工作并不局限于此,结构色也是近年来备受关注的研究领域。基于自然界中存在的结构色现象,利用纳米结构中的共振特性,一般研究思路是通过设计特定的结构来获取特定的光波。传统滤波器依赖于有机染料,而通过设计微纳结构滤波器,能够产生相对狭窄的共振峰,来过滤或选择特定频率的可见光^[29-32],例如金属和电介质相结合的器件结构。更为便捷的是,只需改变结构的几何尺寸就可以实现不同特定色彩的获取。目前来看,自主设计的微纳结构滤波器件能够实现透射或反射特定频率的光波,并且此类器件具有高稳定性,高循环性,可制造性,微纳级尺寸,高空间分辨率等优点^[33-41],在高密度光学数据存储、集成光电、信息技术、生物传感、安全监控、国防军事等领域有良好的应用前景。因此,随着当今信息技术及微纳

光电领域的快速发展,基于表面等离子激元的光学器件基础科研与国防技术需求相结合,为发展有应用前景的军事装备与器件同样具有重要的意义。

1 通过金属纳米结构中表面等离子激元的激发产生结构色

信息社会大量使用的电子显示器和图像传感器,提高了对各种颜色的表征需求和检测需求。发光二极管中的有机发光二极管^[42],聚合物发光二极管^[43],和量子点发光二极管^[44-46]等发光显示器,产生特定的颜色需要单独的滤色器。因此,滤色器是用于发光显示器和图像传感器必不可少的组件^[47],如电荷耦合器件(CCD)^[48],互补金属氧化物半导体(CMOS)^[49-51]和图像扫描仪^[52]。而彩色滤光片的效率与传输频谱的可控性有关^[53,54]。传统的滤色器采用着色或染料掺杂有机颜色,选择性吸收白光^[55,56],并且抗蚀剂的光学性质很大程度上决定了过滤后的颜色,以及过滤器的整体效率。这种类型的滤色器具有很大的局限性,抗蚀剂由于经常暴露在紫外线下或高温中会发生降解,其性能难以保障。其他类型的滤色器已成为克服传统滤色器缺点的替代品。代表性的例子是基于金属纳米结构的滤波器,其特征由几何参数控制,如结构的形状,结构内部的间距和周期^[57-59]。与传统的彩色滤光片不同,这些滤色器的光学特性可以通过改变物理尺寸很容易地调整。此类器件可长期使用,因为这些结构主要由无机材料构成。

1998年Ebbesen等人在实验中发现了异常透射增强现象(Enhanced Optical Transmission, EOT)^[60],实验中的金属薄膜表面具有周期性排列的亚波长小孔,光垂直入射,这样的条件下异常透射增强,这是经典的衍射理论无法解释的。在经典的衍射理论中,光波透过孔径结构的透射率与 $(D/\lambda)^4$ 成正比关系(其中 D 为孔径尺寸, λ 为入射光的波长),所以在这个实验中,周期性排列的孔为亚波长小孔,即 $D < \lambda$,由此可得透过率在理论上应该是极小的^[61]。Ebbesen等人在实验中发现的现象是,当入射光波的波长为某些特定的数值时,透过亚波长小孔的光场能量是远远高于

理论的计算值的。这一实验结果给经典衍射理论带来了十分严峻的挑战,也引发了关于亚波长金属孔透射增强问题的研究热潮,普遍将这一现象归因于表面等离激元的激发和耦合。

设定一定的光栅几何参数和入射角条件,金属中的自由电子发生集群振荡,即通过表面等离子波的激发可以产生表面等离共振效应(Surface Plasmon Resonance, SPR)。表面等离子体激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)是指可迁移的表面电荷(例如金属中的自由电子)在外部电磁场的诱导下发生集群振荡,由此产生的电磁波,简称 SPPs 波,这种波沿着介质表面进行传播。当 SPPs 波远离界面时,波的振幅随远离的距离的增加发生指数衰减。由此可见,这种波局限于介质表面以及表面附近的区域,具有比较强的局域效应,以及近场增强效应^[62]。另外, SPPs 波传播的波矢与在自由空间中的电磁波的波矢并不一致,一般情况下 SPPs 波的波矢总是大于自由空间中的电磁波波矢,这导致了两种波的波矢并不匹配,所以通过空气中的电磁波入射到介质表面,以此来激发表面等离激元的方法没有理论上的支持。需要探究或者设计一定的方法来激发共振,现行的方法一般有通过棱镜耦合,利用波导结构,衍射光栅结构和近场激发等。其中利用衍射光栅的激发原理为,引入一个亚波长金属光栅结构作为布拉格矢,当入射波矢在沿 SPPs 波的波矢方向的分量等于金属光栅的布拉格矢与 SPPs 波的波矢之和时,即可以实现 SPPs 波与自由波矢的互相匹配。通常情况下,利用亚波长纳米金属孔的阵列结构来激发 SPR,其透射峰的波长 λ_{peak} 应满足^[63]

$$\lambda_{\text{peak}} = \frac{2\pi \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}}}{\sqrt{\left(k_p \cos\theta + i \frac{2\pi}{a_x} + j \frac{2\pi}{a_y}\right)^2 + \left(k_p \sin\theta - i \frac{2\pi}{a_x} + j \frac{2\pi}{a_y}\right)^2}} \quad (1)$$

其中, k_p 是入射波矢; θ 为入射光的方位角; a_x 和 a_y 是晶格常数; i 和 j 是阶数; ϵ_m 和 ϵ_d 分别是金属和介质的介电常数。从式(1)可以看出, λ_{peak} 与入射角,晶格常数,及金属和介质的介电常数有关。通过调节晶格常数等参数可以获得整个可见光的色彩范围,得到全光谱的彩色滤波器。

另外,如果将上述结构中的金属光栅换做无损或者低损的介质光栅时,又可激发导模共振效应(Guide Mode Resonances, GMR)。一般认为,导模共振是衍射光栅在一定的几何参数,一定的入射条件下出现的一种异常衍射的现象。导模共振效应所具备的特点也是十分具有优势,带宽极窄,衍射效率高,同时对波长和入射角度的敏感性比较强。导模共振又可以通过调节整体结构的周期参数来进行影响。再与抗反射或者抗透射的膜层相结合,通过器件设计,合理选择器件结构参数,实现导模共振滤波器在理论上是可行的。一般来说,器件设计分为光栅层,波导层,衬底三部分,其折射率依次为 n_1, n_2, n_3 , 共振波长的关系式为^[61]

$$p \cdot (n_2 \sin\theta_d - n_1 \sin\theta_i) = m \cdot \lambda_{\text{peak}} \quad (2)$$

其中, p 是介质光栅的周期, θ_d 是衍射角, θ_i 是入射角, λ_{peak} 为共振峰的波长, m 是阶数。另外,波矢匹配是产生导模共振的条件,即

$$\beta = m \cdot \frac{\lambda_{\text{peak}}}{2} \quad (3)$$

其中, β 为波导模的传播常数。

导模共振的应用领域也是比较广泛的,比如光学存储,波分复用,滤波器等,其中导模共振滤波器的性能非常优异,理论效率几乎能够接近 100%。

2 静态结构下的结构色

2.1 金属薄膜中亚波长孔阵列的结构色

厚金属薄膜中的亚波长孔的周期性阵列可以增强透射这一现象引起了人们对表面等离激元的兴趣。这种现象具有许多潜在的应用,例如光刻技术。这一工作的目的是开发一种汽车应用方面的图像传感器。首先,器件需要具有高的可靠性,另外,从耐用性的角度来看,金属滤色器优于染料过滤器。文献[62]对 Al 薄膜中的亚波长孔中的特殊传输现象进行了研究。Al 在 400~500nm 范围内具有较低的光学损耗,此外,Al 易于加工且成本低于金银。文章利用 Al 薄膜中的亚波长孔实现了彩色滤波器的设计,并测量比较了透射光谱的偏振依赖性。工艺上使用等离子体化学气相沉积法,Al 层厚度为 150nm, SiO₂ 层厚度 100nm, SiO₂ 沉积在 Al 表面上,表面等离激元(SPs)模式

耦合在两个界面处的 SPs 模式频率相同时最有效, 在孔的两侧具有相等的介电常数^[64]。

图 1(a), (b) 分别为 Al 膜中的圆形孔和三角形孔 SEM 图像。另外, 这项研究还设计了其他形状的孔, 比如矩形。工作中改变了同一形状的不同周期, 以及改变了不同形状, 通过这些孔径测量了透射光谱, 在这样的变化中比较透射率的高低以及滤取波段的不同, 如图 1(d)。图 1(c) 给出了与颜色条相对应的孔阵列, 其中正方形边长、等边三角形的边长以及圆的直径参数值均取单元结构周期值的一半。此外, 关于偏振依赖性的测量如图 1(e) 所示, 分别在 0 度和 30 度的偏振角度下进行入射, 所得结果并没有差距, 即此器件具有偏振角度不敏感的特性。在 $150\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ 的尺寸范围内实现了彩色滤波。

基于工作的初衷, 即应用于汽车领域来看, 器件所选取的材料节约了成本, 通过不同形状的孔径的比较, 确定了最优结构以及参数, 另外, 偏振角度不敏感的特性在汽车领域也具有可用性。除此之外, 器件的透射率最高仅达到 50%, 结构尺寸在微米级别, 其在集成器件中, 尺寸并不占优势。利用亚波长孔结构来进行滤波的工作不在少数,

此外我们还列出了相关的几项工作。

如图 2 所示, 设计不同的孔阵列, 每个孔阵列在可见光谱中具有红色(图 2(b)), 绿色(图 2(c)) 或蓝色(图 2(d)) 部分的通带。在每个图中, 显示了铝孔阵列具有三组不同涂层的数据。分别适用于以下情况: 无涂层, 一层 100nm 的 SiO_2 和 200nm 的 SiO_2 层^[65]。从图 2 中的数据可以清楚地看出, 增加的 SiO_2 涂层的添加对三个滤波器中的每一个都具有增益效果。在所有情况下, 随着 SiO_2 涂层的添加, 峰值波长会出现微小的红移, 并且峰值的透射系数也会增加。在图 2(a) 中, 没有 SiO_2 涂层的红色滤光片的光谱中显示出有两个几乎幅度相等的峰。通过添加 200nm 的 SiO_2 层, 长波长峰值 λ_L 的透射率显著增加, 而短波长峰值 λ_S 的透射率减小。肉眼可以清楚地看到这种改善的效果。通过蓝色和绿色滤色器的透射光在沉积 200nm 的 SiO_2 涂层后也具有明显的亮度增强。具有 200nm SiO_2 覆盖层的所有滤波器表现出高于 30% 的峰值透射率。每个滤波器的半高全宽(FWHM) 约为 100nm, 因此可确保低色彩交叉。通过增加 SiO_2 涂层厚度, 可以增加 SiO_2 介质层与 Al 层之间的表面等离子效应, 从而很好

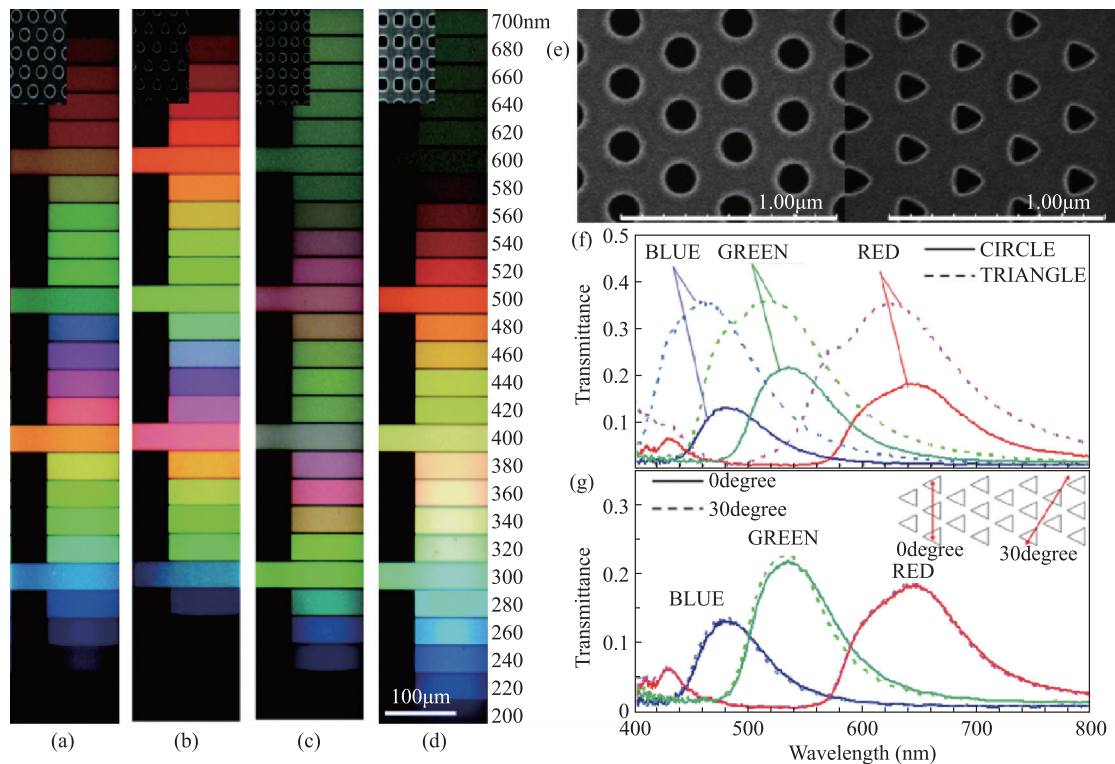


图 1 (a)(b)(c)(d) 分别为不同形状亚波长孔结构的滤波效果; (e) 为圆形孔和三角形孔的电镜照片; (f) 图表示圆形孔和三角形空不同滤波效果的对比; (g) 图为三角形孔结构下不同角度入射波的滤波效果对比^[62]。

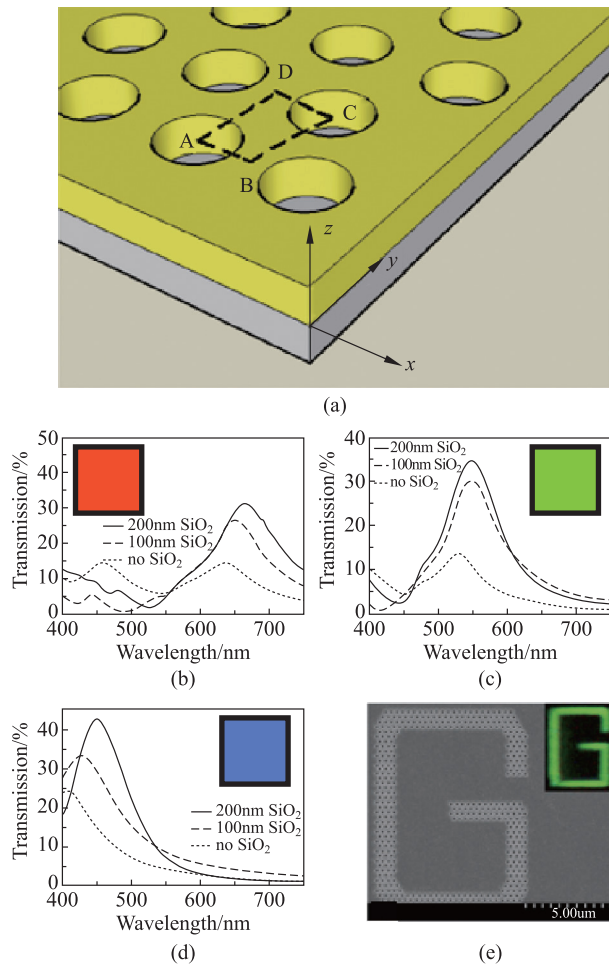


图 2

(a) 展示了结构的三维图；(b)(c)(d) 分别为 RGB 三原色的滤波设计；(e) 图中利用设计的结构排列并实现了滤波显示“G”字型^[65]。

地提升透射率。此外,由于介质折射率提升的影响,会带来透射波峰位置的微小红移。

插图是具有 200nm SiO₂ 覆盖层的三原色滤波器的透射光图像。这些图像由集成在显微光谱仪上的 CCD 阵列捕获。每个彩色图像由 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 的孔阵列组成。如图 2(e) 所示,设计一个由 $a = 330\text{nm}$ 的孔组成的字母“G”形,其中孔阵列的周期数小至 3。如插图所示,在白光照射下出现清晰的绿色字母“G”。与早期工作中的结构不同,此结构中蚀刻孔周围没有凹坑。这意味着在高分辨率图像传感器上像素尺寸可以小至 $1\mu\text{m}$ 。

这项研究基于亚波长孔阵列实现了三原色的滤波,并通过改变 SiO₂ 覆盖层的厚度对透射率进行调控,最终达到提升的效果。利用滤波器件的排列,实现了形状上的显色。这是一个很好的

启发。

图 3 所示研究报告了等离子体孔阵列的光学特性,适用于硅质 CMOS 图像传感器的设计要求。其中孔阵列由填充六角形的亚波长尺寸的孔组成,基于 150nm 的 Al 膜上进行结构设计^[66]。对于大型(大于 $5 \times 5\mu\text{m}^2$)尺寸的滤光片,孔阵列的等离子体滤光片峰值透射率在 40%~50% 左右,而对于小至 $1 \times 1\mu\text{m}^2$ 的像素尺寸仍然能够保持其滤光功能,尽管在传输效率上有所下降。

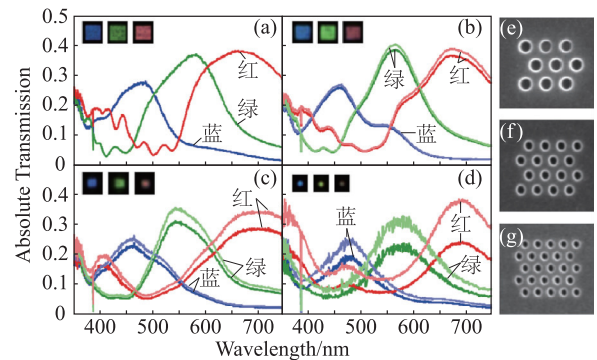


图 3 孔阵列滤光片的透射光谱优化为红色($p = 420\text{nm}$, $d = 240\text{nm}$),绿色($p = 340\text{nm}$, $d = 180\text{nm}$)和蓝色($p = 260\text{nm}$, $d = 140\text{nm}$),不同滤光片尺寸为(a) $10\mu\text{m}^2$ (b) $5\mu\text{m}^2$ (c) $2.4\mu\text{m}^2$ 和(d) $1.2\mu\text{m}^2$ 。(e)~(f) SEM 图像分别是 $1.2\mu\text{m}$ 尺寸实现 RGB 分色的滤光片^[64]。

此外,这项研究对空间串扰还有相关分析和讨论。文章指出在检测极限内,此孔阵列滤波器像素之间的空间串扰对整体器件的滤波功能是几乎不影响的,并且在包含随机缺陷的阵列中依然能够保持其滤波功能。通过对孔阵列滤波器透射率和串扰的分析表明,最近邻孔洞间的相互作用而非长程相互作用在等离子体孔阵列滤波器的传输特性中起主导作用。

总体来说,这项研究利用亚波长孔阵列,通过改变孔径的距离以及单元结构的周期,在不同的像素尺寸下成功实现了滤波,此外其关于空间串扰的讨论是值得注意的。相较前文提到的工作,在透射率上并没有较大提升,仍维持在 40% 左右。

2.2 金属-绝缘体-金属纳米谐振器的结构色

金属-绝缘体-金属(MIM)的器件结构,在可见光的频率下能够支持光子和表面等离子激元模式,表面等离子激元在这种结构下能够被正常激发,这种结构目前已经被广泛研究,且投入到了不同的应用中,例如亚波长尺度的导波,在薄膜光伏

中聚光,组成负折射材料。此外,MIM 结构顶部和底部的金属层能够直接集成为电极,因此这种结构在电光学应用领域具有很大的潜力和良好的前景。

图 4 所示研究展示了使用金属-绝缘体-金属谐振器将白光过滤成单色的方法。谐振器在可见频率下支持光子模式,实验结果表明,无源 Ag/ Si_3N_4 /Au 谐振器在整个可见光谱中都有滤色功能。在有源谐振器上进行全场电磁仿真,谐振器长度从 $1\sim 3\mu\text{m}$ 变化,输出狭缝深度在整个介电层厚度上系统变化。这种谐振器基于介电层内的光学模式间的干涉来过滤颜色。通过设计,谐振

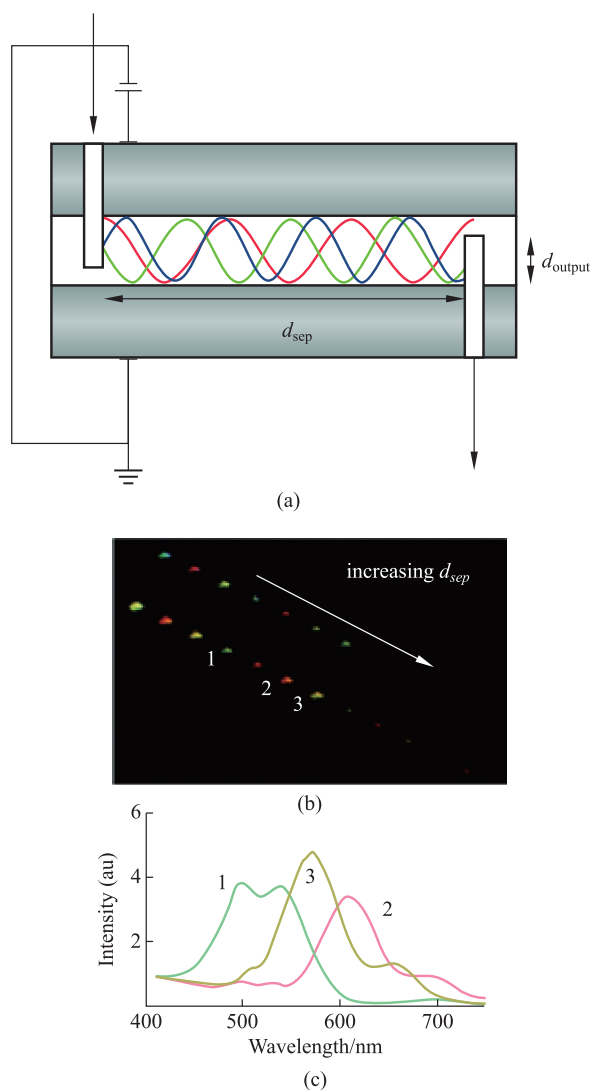


图 4 无源 MIM 波导中的滤色在(a)中示出。该结构由作为顶层的 400nm 的银,作为电介质的 500nm 的氮化硅和作为底层的 400nm 的金组成。器件 1~3 分别具有 $2.5\mu\text{m}$, $3.5\mu\text{m}$ 和 $4\mu\text{m}$ 的腔长 d_{sep} 相应的输出光谱如图(c)所示^[67]

器可以选择性地耦合到不同光子模式的强度的最大值,并且因此优先选择任何原色。此外,后续工作进一步设计了如何利用金属-绝缘体-金属谐振器中的折射率调制产生可主动调谐的滤色器。使用铌酸锂作为介电层,并且将顶部和底部的 Ag 层作为电极,模拟表明可以利用施加外加电压在可见光范围内调谐输出不同颜色的光波^[67]。

基于 MIM 的结构设计滤波器,通过改变谐振器的长度以及谐振腔的厚度实现了滤波,又利用两个金属层作为电极,实现了调谐滤波。但其主动调谐滤波是在施加了外加电场的条件下实现,其主要的局限性在于器件成型后不便更改,调谐方式也只能基于已有结构进行。总体来看,前文所提到的结构对于效率的提升作用并不是很明显,因此可以考虑光栅结构。

金属光栅是具有高度的波长选择性的,是一种高效的光学元件。具有亚波长周期的超薄一维银(Ag)光栅的高透射减色滤波器如图 5(a)所示。由于 LSPR 和短程平面极化子的杂交导致了非常低的透射效应(ELT),ELT 效应导致传输频谱下降。同时,由于 Ag 自身的光学特性,在共振波长处的透射率很高,这使得该纳米结构成为有效的减色滤波器。这种简单的一维等离子体光栅滤波器的效率就可达到 $60\%\sim 70\%$,这在减色滤波器设计中非常有效。另一方面,通过添加不同介质匹配层实现高效的滤色器也是非常有价值的。比如,具有高折射率介电波导层的 Al 光栅可以提供超过 70% 的效率传输峰值^[71]。通过导模共振效应(GMR)实现滤色^[72,73]。光栅的衍射模式与平面介质波导的导模之间的 GMR(Al 光栅作为上层,石英基板作为下层)很容易发生模式诱导,因为它们之间实现了相位匹配。导模共振使得传输效率大大提升。

如图 5(c)所示,报道了相似的纳米结构,但在金属光栅和高折射率波导层之间有缓冲层。缓冲层的厚度可以控制金属光栅中导模的损耗,这可以通过金属-介质波导理论来解释。因此,这种具有缓冲层的纳米结构可以实现窄带谐振和高效率的传输。效率高,带宽窄,这种特性适合于产生高纯度的颜色。金属-绝缘体-金属(MIM)结构中的共振也可用于将白光过滤成单独的颜色^[74-77]。传统滤色器最重要的限制是透光率低,因此将衍射效应引入 MIM 结构以提高其效率是有价值的。

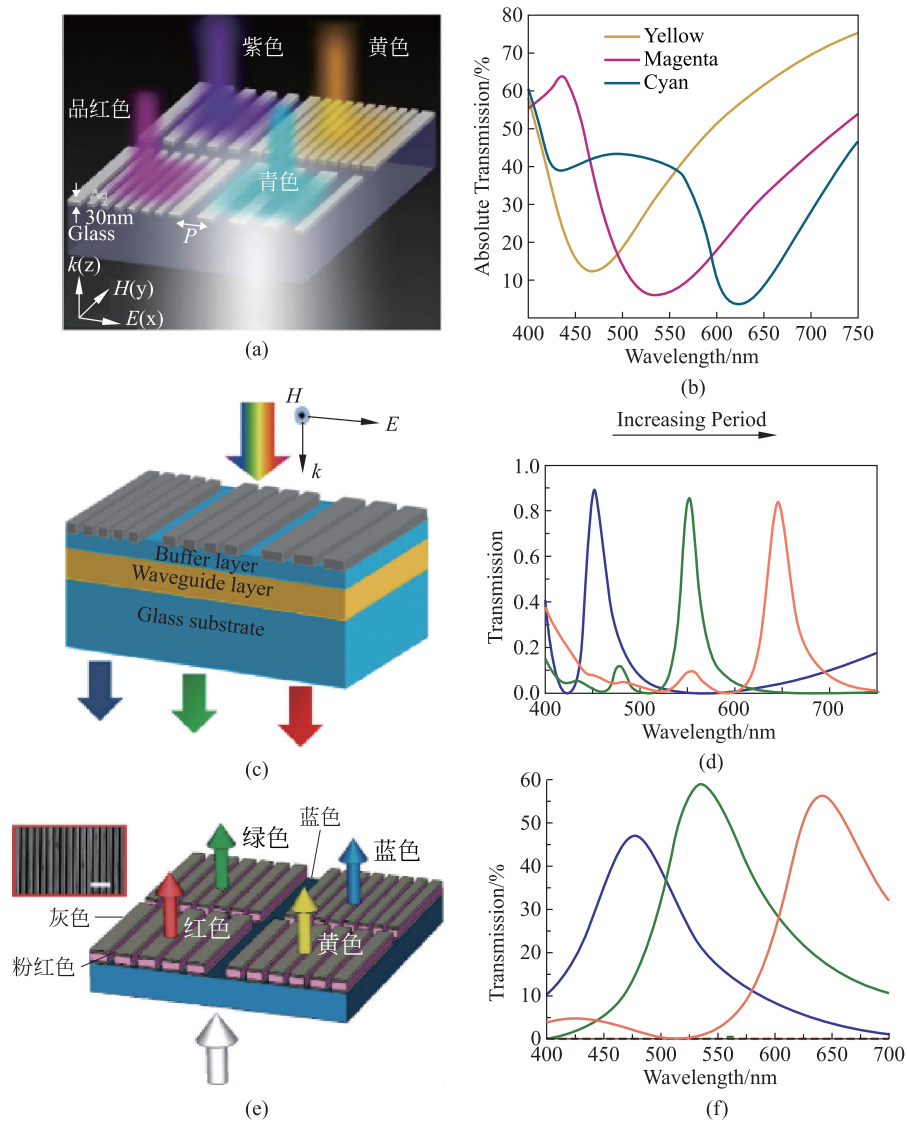


图 5

(a) 结构示意图。白光从玻璃侧入射,青色,品红色,紫色和黄色光束代表透射的彩色光通过 30nm 厚的不同周期的 Ag 纳米颗粒; (b) 由 30nm 厚的 Ag 纳米颗粒组成的黄色,品红色和青色等离子体 SCFs 的 TM 透射光谱,其周期分别为 230nm, 270nm 和 350nm^[68]; (c) 透射滤波器结构的示意图; (d) 模拟的透射光谱^[69]; (e) 所提出的等离子体纳米谐振器的示意图。白色箭头表示入射白光,红色,黄色,绿色和蓝色箭头表示来自不同堆叠阵列的透射彩色光。结构中的灰色,粉红色和蓝色分别表示铝,硒化锌和氟化镁的材料。插图是制造的装置的扫描电子显微镜图像。比例尺, 1 μ m; (f) RGB 滤光片的模拟透射光谱。实线和虚线曲线分别对应于 TM 和 TE 照明。RGB 滤波器的堆栈周期为 360nm, 270nm 和 230nm^[70]。

在图 5(e) 中, MIM 光栅由 Al-ZnSe-Al 谐振器构成。底部 Al 光栅通过衍射将入射光耦合到等离子体激元波导模式, 并且顶部 Al 光栅通过将光散射到远场方向来重新转换等离子体传播波, 而 ZnSe 层确保顶部和底部 Al 层 SP 模式的有效耦合。

这种光子-等离子体-光子转换有效地增强了特定波长的传输。该 MIM 光栅的周期在 200nm

至 400nm 之间变化, 以实现任意颜色的获取, 有助于获得彩色图像和显示器的高分辨率(图 5(f))。

3 可动态调谐纳米结构的结构色

该工作在石英衬底上采用聚焦光束(FIB)技术制作了亚波长图案化的 Au 纳米结构。在可见范围内, 穿孔的金属薄膜能够产生光学透射峰, 因

此可以用作等离子体滤色器。此外,通过将一层光响应液晶(LC)与金纳米结构结合以形成混合系统,观察到透射峰波长的红移。更重要的是,可以进一步提高 10% 以上的透射率,使其两侧的介质的折射率匹配。通过使用 UV 光光学泵浦混合系统,实现了 LC 的各向同性相变,从而改变了入射光所经历的有效折射率。利用折射率的变化,可以相应地调制透射峰值强度,实现了光学可调谐等离子体滤波器。这种滤波器有许多潜在应用,例如应用在互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器、液晶显示器件、发光二极管等^[78]。

利用 Au 与液晶材料来进行器件设计,通过尝试不同的器件结构对比透射率,UV 泵随着时间变化透射率也会有相应的改变,从不同的方向给出了提升透射率的方法,总体来看透射率基本能够达到 50%~60%,这样的效果基本可以满足实际应用,但是 Au 的使用对于量产来说,器件造

价不菲将是一个问题。图 7 所示工作展示了亚波长等离子体彩色印刷技术,使用圆形等离子体共振器(GPR)排列在周期 340nm 的单元阵列中,工艺上采用单螺旋光束光刻技术制造^[77]。所利用的打印程序,能够保证单像素色彩再现,彩色区域的高色彩均匀性和高再现保真度。此外,还证明了 GPR 对表面活性剂的稳定性。这种彩色印刷结构可以用透明的电介质覆盖层保护,而不破坏其着色,但文章建议在模拟中,需要最大限度地减少保护层的影响。文章使用有限元法进行仿真模拟。

纳米盘周期结构的设计将反射率提升至 60% 以上,结构中可以通过改变纳米盘的半径以及 SiO₂ 层的厚度来实现不同的效果,在实际的彩色打印中也给出了很好的成果。新颖器件的设计给了我们在工作中的很多启发。

图 8 所示工作在结构上的设计更为新颖。超

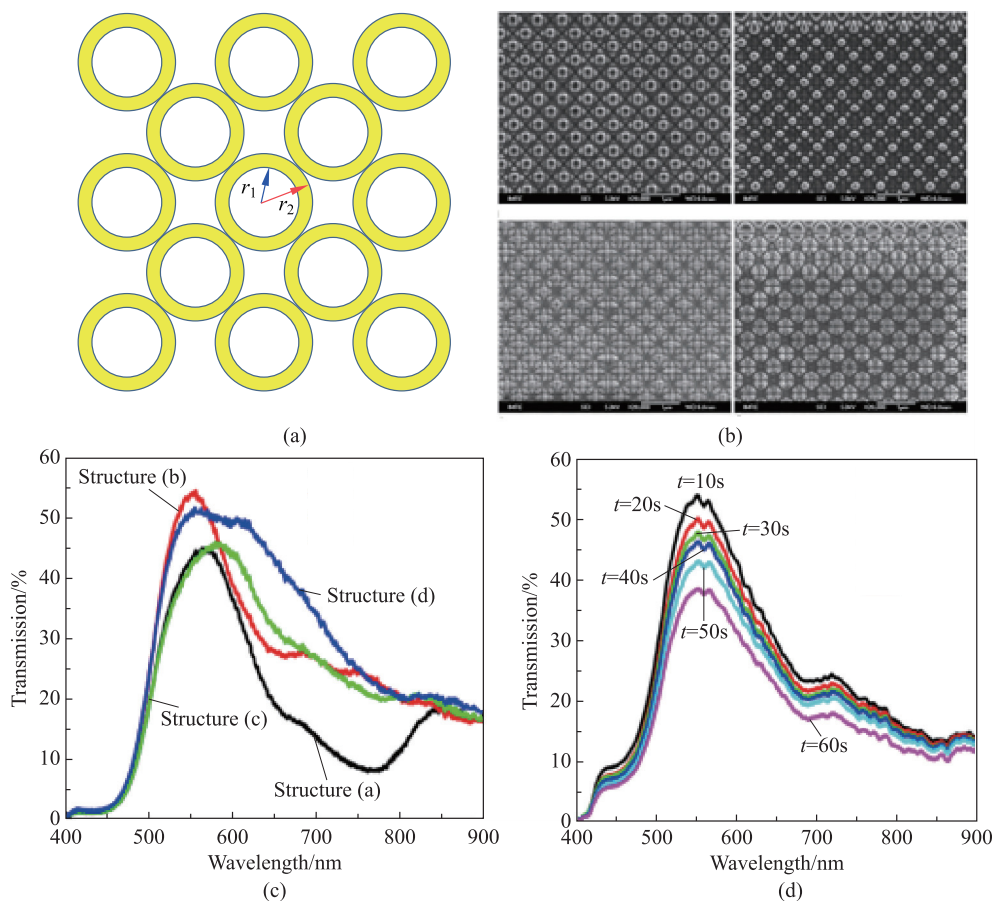


图 6

(a) 基于纳米图案化的二维等离子体晶体制造的 FIB 光刻方法的示意图。每个单独纳米棒的内半径和外半径分别标记为 r_1 和 r_2 ; (b) 具有不同内半径和外半径的 Au 等离子体纳米结构的 SEM 图像; (c) 在正常入射的非偏振光的光响应 LC 的渗透之后, Au 等离子体纳米结构的透射光谱; (d) 在 UV 泵下对 Au 纳米结构的透射光谱随时间的演变^[78]

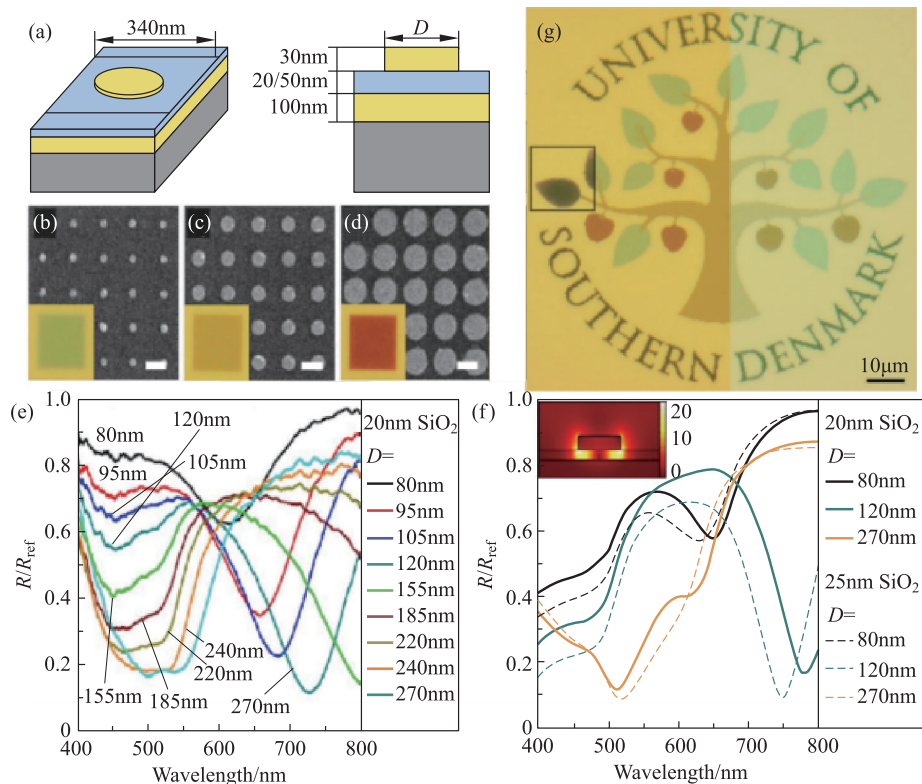


图 7

(a) 基本结构图；(b)(c)(d) 平均尺寸为 80, 120 和 270nm 的 ND 的 SEM 图像；(e) 来自 ND 的反射光谱, 其具有在 20nm SiO₂ 上增加的直径, 用 50 倍物镜 (NA=0.75) 收集来自 SiO₂ 的反射归一化；(f) 针对 SiO₂ 在金表面上的反射光谱归一化的有限元模拟, 示出了 SiO₂ 厚度为 20 和 25nm；(g) 插图针对在 780nm 处的一阶 FP 共振处, 120nm ND 照射的入射幅度归一化的电场增强^[79]

表面光学元件, 可以模仿和扩展反射光学器件的功能, 具有相对较小和较为平面的轮廓。由于目前使用的材料和制造技术, 在可见波长处会产生较高的光学损耗。这项工作介绍了一种在可见光范围内具有高效率传输的表面。作为表面的基础, 使用材料为二氧化钛。工艺上采用一种基于原子层沉积的制造方法, 可以产生高度各向异性的纳米结构。使用表面粗糙度小于 1nm 的无定形二氧化钛原子层沉积, 光的损失可忽略不计, 具有优良的效率 (>78%)^[79,80]。与传统的折射光学元件相比, 此器件厚度大大减小。这在实际应用中是一个很大的优势。

如前文工作提到的, 二氧化钛是令人瞩目的研究材料。由于金属中固有的欧姆损耗和带间跃迁阻碍了纯色所需的高效率和窄带宽, 而图 9 所示研究中, 利用硅基板上的不对称氧化钛椭圆纳米像素阵列实现了具有高饱和度、高效率、高分辨率 (超过 90%) 的偏振敏感结构色^[81]。基于这种全电介质纳米结构, 由于法诺共振, 可以在可见光

谱中形成接近理想效率的完美窄光谱, 可以在两个正交偏振入射光下同时获得可调谐色调和饱和度的颜色。基于氧化钛超曲面的优越性能, 所提出的设计策略有望形成新的实际应用, 如高密度光学数据存储、纳米级光学元件、传感、安全等。但其缺点在于, 工艺上成型后器件本身结构将难以实现改变, 这在上述领域的应用中是将会是一大短板。

前文所述的结构色滤波器, 由于依赖于明确定义的结构纳米尺度, 通常表现出有限的可扩展性。各种制造工艺如纳米压印, 转印和纳米球自组装技术正在被研究, 以取代光刻工艺, 来实现成本的进一步降低。由于上述缺点, 使用吸收抗蚀剂的传统滤波片, 或等离子体纳米结构的滤波器, 是一种静态光学原则上的滤波器, 它固定了特定的颜色。相关技术虽然能够调制器件的整体透射率, 然而, 并不能连续改变滤取光波的频率。可拉伸光子学的进步能够实现动态控制滤波后的频谱。但存在的缺点是, 其制造在很大程度上依赖

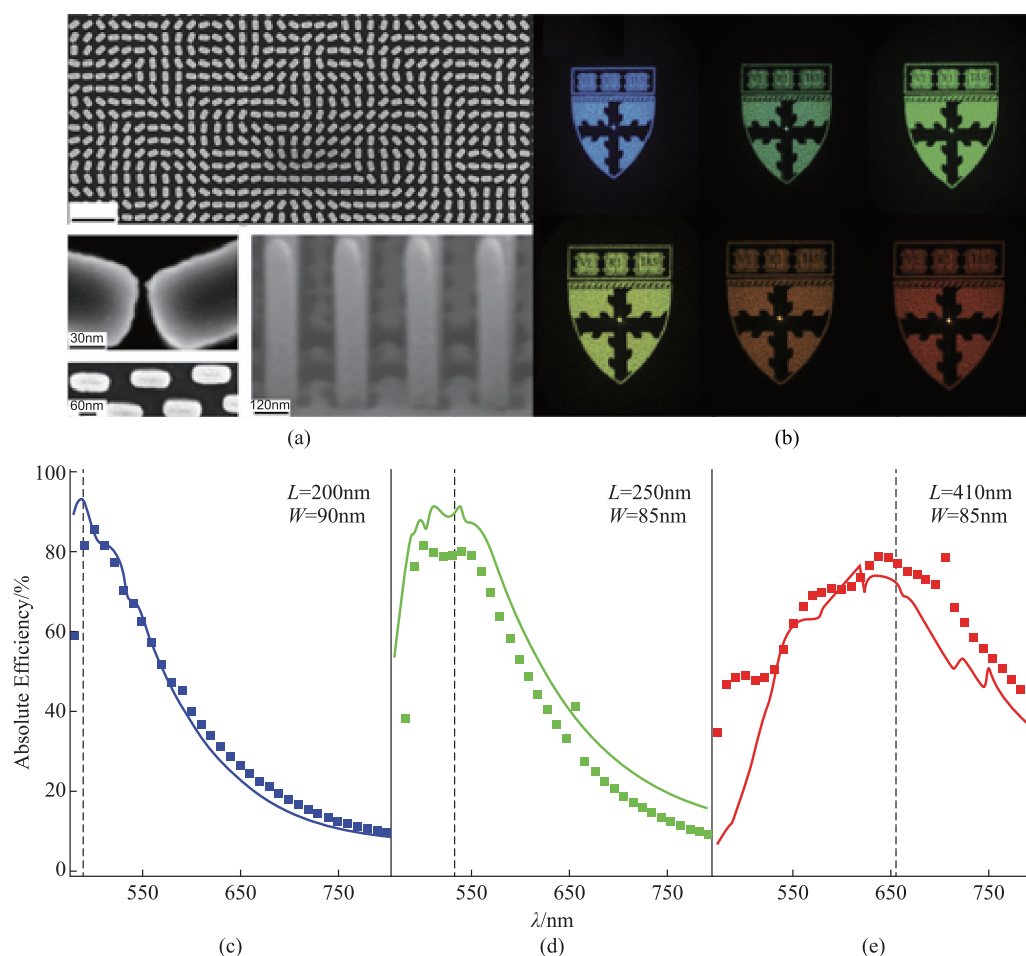


图 8

(a) 结构的电镜图; (b) 变色校徽以及(c) 蓝色; (d) 绿色; (e) 红色的滤波效果,^[80]

于复杂的光刻技术流程。到目前为止动态控制滤波色彩仍然是一项具有挑战性的任务。但是在可穿戴电子和表皮传感器等领域能够满足光源波长可变的需求。

这项研究展示了一种基于自组装各向同性可拉伸微珠单层的连续可调滤色器。采用的可拉伸衬底为聚二甲基硅氧烷(PDMS),六方密堆积的纳米球采用的材料为 SiO_2 ,利用4f系统在光屏上获得滤波^[80]。各向同性可拉伸的单分子层在横向应变的应用过程中,衍射等距离上的传播只依靠机械调制即可完成。结合简单的空间滤波方案,在可见光波段,滤光光谱完全由外部应变(高达32%径向应变)控制。通过有限差分场域衍射仿真,此工作也验证了所提出的彩色滤光片的工作原理。文章所提出的连续可调滤波器有望在下一代的显示领域中开辟新的应用。其目前的局限性在于工艺方面,可机械拉伸的器件在工艺制

作中还存在挑战。但综合来说,基于动态调控材料的可调节光子器件^[83,84]的发展拥有广阔前景。

4 结语

综上所述,通过对于微纳光电器件的结构材料以及结构几何参数改变,可以对其中产生的表面等离激元进行实现精准调控,从而操控纳米结构中的光和物质相互作用产生生动鲜艳的结构色。因此,在所报告表面等离激元效应产生的结构色中,等离子体彩色印刷在其超高亚波长分辨率,海量光学数据存储和集成化方面,极大地优于传统的基于颜料或彩色的彩色印刷。尽管金属薄膜上厚度为几纳米到几十纳米的高吸收性薄膜可以支持基于选择性吸收的可见光色,但一般来说,材料的固有吸收在可见光范围会产生宽广且不太强烈的共振,这会显著降低亮度和颜色对比。在

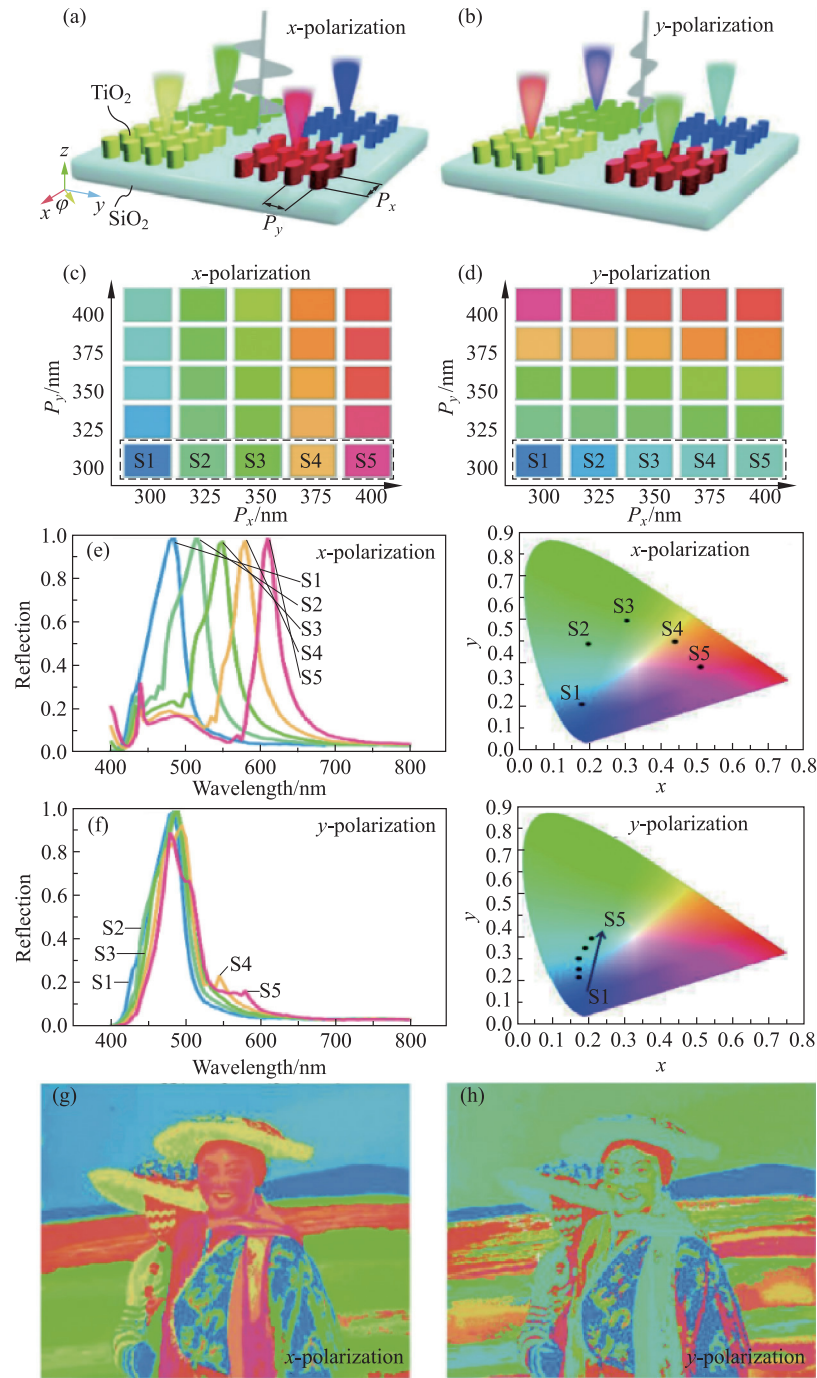


图9 在二氧化硅衬底上具有周期性氧化钛椭圆纳米像素的全电介质滤色器的结构。图(c),(d)中虚线框表示的像素的偏振调谐反射光谱以及相应的入射角依赖性。模拟的反射光谱在增加 P_x 时获得在(a)x偏振光和(b)y偏振光下,从300在25nm的步长下达到400nm。对于(e)x偏振和(f)y偏振,从S1到S5的反射光谱的相应CIE 1931色度坐标,箭头表示从S1到S5的变化。(g),(h)印刷“母子”画的再现。再生中的颜色是由分别在(a)x偏振和(b)y偏振入射光下具有不同周期和直径的 TiO_2 纳米结构产生的^[79]。

可见光范围内为了提高色彩印象,具有低损耗的介电材料表现出了优异性能。通过使用全介质材料,在整个可见光谱范围内可以改善颜色对比。但是,大多数彩色纳米印刷工作都是基于静态结

构的。静态结构限制了器件本身的延展性,这导致在防伪、动态全彩显示和高度安全加密领域,滤波器的应用面临挑战。此外,基于静态结构的动态调控比如利用电压调控,改变器件参数等方法

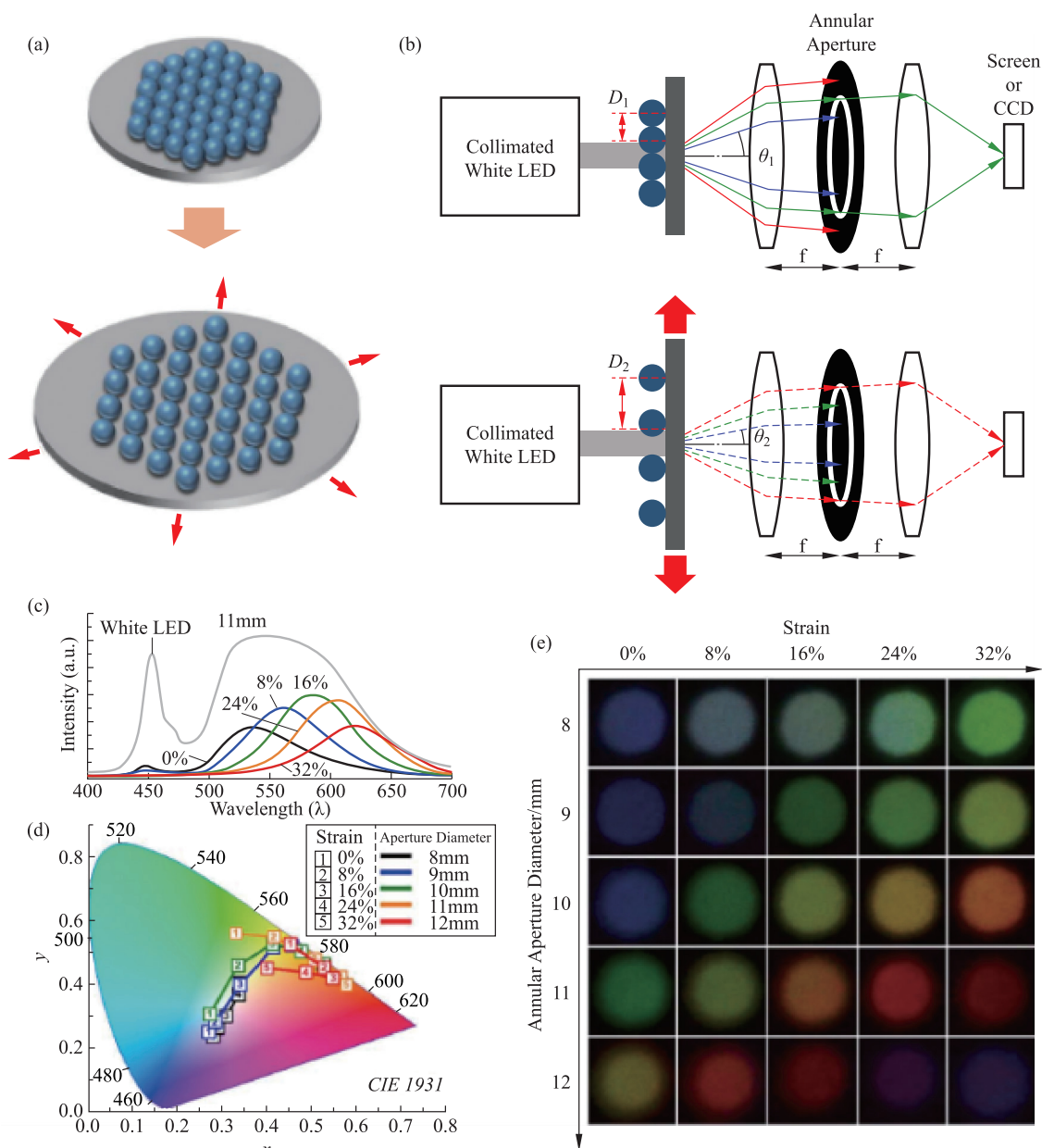


图 10

(a) 微珠单层在未拉伸和拉伸状态下具有六边形密堆积结构,其用作衍射光栅;(b) 准直白光的衍射角根据机械应变而变化,随着间距增加,机械应变变小;(c) 机械应变下透射光的光谱;(d) 本函所实现的全彩色代码表;(e) 色度图^[82]

是非常有限的,器件成形后的结构改变往往难以实现。由此,动态结构的优越性不言而喻,基于可拉伸衬底的可拉伸光子学的发展,从结构方面解决了静态结构的局限性。在未来的滤波器发展中,基于新型结构,新型材料的动态调谐器件将拥有广阔前景。

参 考 文 献

[1] SRINIVASARAO M. Nano-optics in the biological world;

beetles, butterflies, birds, and moths[J]. Chemical reviews, 1999, 99(7): 1935-1962.

[2] WHITNEY H M, KOLLE M, ANDREW P, et al. Floral iridescence, produced by diffractive optics, acts as a cue for animal pollinators[J]. Science, 2009, 323(5910): 130-133.

[3] KINOSHITA S, YOSHIOKA S. Structural colors in nature: The role of regularity and irregularity in the structure [J]. ChemPhysChem, 2005, 6(8): 1442-1459.

[4] KINOSHITA S, YOSHIOKA S, FUJII Y, et al. Photo-physics of structural color in the Morphobutterflies[J]. Forma-Tokyo-, 2002, 17(2): 103-121.

- [5] GAO X, YAN X, YAO X, et al. The dry-style antifogging properties of mosquito compound eyes and artificial analogues prepared by soft lithography[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(17): 2213-2217.
- [6] PARKER A R, MCPHEDRAN R C, MCKENZIE D R, et al. Photonic engineering. Aphrodite's iridescence[J]. *Nature*, 2001, 409(6816): 36-37.
- [7] MARLOW F, MULDAKISNUR, SHARIFI P, et al. Opals: Status and prospects[J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2009, 48, 6212-6233.
- [8] DARRAGH P J, GASKIN A J, TERRELL B C, et al. Origin of precious opal[J]. *Nature*, 1966, 209(5018): 13.
- [9] PARKER A R, WELCH V L, DRIVER D, et al. Structural colour: Opal analogue discovered in a weevil[J]. *Nature*, 2003, 426(6968): 786.
- [10] VUKUSIC P. Natural photonics [J]. *Physics World*, 2004, 17(2): 35.
- [11] SEAGO A E, BRADY P, VIGNERON J P, et al. Gold bugs and beyond: a review of iridescence and structural colour mechanisms in beetles (Coleoptera)[J]. *JR Soc. Interface*, 2009, 6: S165-S184.
- [12] KOENDERINK A F, ALU A, POLMAN A. Nanophotonics; Shrinking light-based technology [J]. *Science*, 2015, 348(6234): 516-521.
- [13] SCHULLER J A, BARNARD E S, CAI W, et al. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation [J]. *Nature materials*, 2010, 9(3): 193.
- [14] ATWATER H A, POLMAN A. Plasmonics for improved photovoltaic devices[J]. *Nature materials*, 2010, 9(3): 205.
- [15] CALDWELL J D, VURGAFTMAN I, TISCHLER J G, et al. Atomic-scale photonic hybrids for mid-infrared and terahertz nanophotonics [J]. *Nature nanotechnology*, 2016, 11(1): 9.
- [16] MEINZER N, BARNES W L, HOOPER I R. Plasmonic meta-atoms and metasurfaces [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(12): 889-898.
- [17] XIA F, WANG H, XIAO D, et al. Two-dimensional material nanophotonics[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(12): 899-907.
- [18] GRAMOTNEV D K, BOZHEVOLNYI S I. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. *Nature photonics*, 2010, 4(2): 83.
- [19] FANG Z, ZHU X. Plasmonics in nanostructures[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(28): 3840-3856.
- [20] WANG J, MA J, SHU J, et al. Tunable Terahertz Metamaterials based on Multifocusing Bidirectional Arrangement in Different Dimensions[J]. *IEEE Photon. J.*, 2019, 11(1): 4600311.
- [21] CHENG K, HU Z D, WANG Y, et al. High performance terahertz vortex beam generator based on square-split-ring metasurfaces[J]. *Opt. Lett.*, 2020, 45(21): 6054-6057.
- [22] SPINELLI P, FERRY V E, VAN DE GROEP J, et al. Plasmonic light trapping in thin-film Si solar cells [J]. *Journal of Optics*, 2012, 14(2): 024002.
- [23] ZHU J, YU Z, FAN S, et al. Nanostructured photon management for high performance solar cells[J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2010, 70(3-6): 330-340.
- [24] FERRY V E, VERSCHUUREN M A, LARE M C, et al. Optimized spatial correlations for broadband light trapping nanopatterns in high efficiency ultrathin film a-Si: H solar cells[J]. *Nano letters*, 2011, 11(10): 4239-4245.
- [25] FERRY V E, VERSCHUUREN M A, LI H B T, et al. Light trapping in ultrathin plasmonic solar cells[J]. *Optics express*, 2010, 18(102): A237-A245.
- [26] ZHU J, YU Z, BURKHARD G F, et al. Optical absorption enhancement in amorphous silicon nanowire and nanocone arrays[J]. *Nano letters*, 2008, 9(1): 279-282.
- [27] WANG K X, YU Z, LIU V, et al. Absorption enhancement in ultrathin crystalline silicon solar cells with antireflection and light-trapping nanocone gratings[J]. *Nano letters*, 2012, 12(3): 1616-1619.
- [28] WANG S, WEIL B D, LI Y, et al. Large-area free-standing ultrathin single-crystal silicon as processable materials [J]. *Nano letters*, 2013, 13(9): 4393-4398.
- [29] CHEN X, JIA B, SAHA J K, et al. Broadband enhancement in thin-film amorphous silicon solar cells enabled by nucleated silver nanoparticles[J]. *Nano letters*, 2012, 12(5): 2187-2192.
- [30] PATHI P, PEER A, BISWAS R. Nano-photonic structures for light trapping in ultra-thin crystalline silicon solar cells[J]. *Nanomaterials*, 2017, 7(1): 17.
- [31] WU C, NEUNER III B, JOHN J, et al. Metamaterial-based integrated plasmonic absorber/emitter for solar thermo-photovoltaic systems [J]. *Journal of Optics*, 2012, 14(2): 024005.
- [32] ZHOU L, TAN Y, JI D, et al. Self-assembly of highly efficient, broadband plasmonic absorbers for solar steam generation[J]. *Science Advances*, 2016, 2(4): e1501227.
- [33] PANAGIOTOPOULOS N T, DIAMANTI E K, KOUTSOKERAS L E, et al. Nanocomposite catalysts producing durable, super-black carbon nanotube systems: Applications in solar thermal harvesting[J]. *ACS nano*, 2012, 6(12): 10475-10485.
- [34] HU X, XU W, ZHOU L, et al. Tailoring graphene oxide-based aerogels for efficient solar steam generation under one Sun[J]. *Advanced materials*, 2017, 29(5): 1604031.
- [35] LI X, XU W, TANG M, et al. Graphene oxide-based efficient and scalable solar desalination under one sun with a confined 2D water path[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 116(49): 13953-13958.

- [36] HU X, ZHANG X, LIANG L, et al. High-performance flexible broadband photodetector based on organolead halide perovskite[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(46): 7373-7380.
- [37] YUAN H, LIU X, AFSHINMANESH F, et al. Polarization-sensitive broadband photodetector using a black phosphorus vertical p-n junction[J]. *Nature nanotechnology*, 2015, 10(8): 707-713.
- [38] MANGA K K, WANG J, LIN M, et al. High-performance broadband photodetector using solution-processible PbSe-TiO₂-graphene hybrids[J]. *Advanced materials*, 2012, 24(13): 1697-1702.
- [39] WANG H, CHEN Q, WEN L, et al. Titanium-nitride-based integrated plasmonic absorber/emitter for solar thermophotovoltaic application[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(6): 329-334.
- [40] ZHOU W X, SHEN Y, HU E T, et al. Nano-Cr-film-based solar selective absorber with high photo-thermal conversion efficiency and good thermal stability[J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28953-28962.
- [41] YAN J, KIM M H, ELLE J A, et al. Dual-gated bilayer graphene hot-electron bolometer[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(7): 472.
- [42] GEFFROY B, LE ROY P, PRAT C. Organic light-emitting diode (OLED) technology: Materials, devices and display technologies[J]. *Polymer International*, 2006, 55(6): 572-582.
- [43] BURROUGHERS J H, BRADLEY D D C, BROWN A R, et al. Light-emitting diodes based on conjugated polymers[J]. *Nature*, 1990, 347(6293): 539.
- [44] CARUGE J M, HALPERT J E, WOOD V, et al. Colloidal quantum-dot light-emitting diodes with metal-oxide charge transport layers[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(4): 247.
- [45] SABNIS R W. Color filter technology for liquid crystal displays[J]. *Displays*, 1999, 20(3): 119-129.
- [46] CHO H, HAN S, KWON J, et al. Self-assembled stretchable photonic crystal for a tunable color filter[J]. *Optics letters*, 2018, 43(15): 3501-3504.
- [47] PLATANIOTIS K, VENETSANOPOULOS A N. Color image processing and applications[M]. Berlin, Springer Science & Business Media, 2013: 169.
- [48] DILLON P L P, LEWIS D M, KASPAR F G. Color imaging system using a single CCD area array[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1978, 25(2): 102-107.
- [49] LULÉ T, BENTHIEN S, KELLER H, et al. Sensitivity of CMOS based imagers and scaling perspectives[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2000, 47(11): 2110-2122.
- [50] YOKOGAWA S, BURGOS S P, ATWATER H A. Plasmonic color filters for CMOS image sensor applications[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(8): 4349-4354.
- [51] HORIE Y, HAN S, LEE J Y, et al. Visible wavelength color filters using dielectric subwavelength gratings for backside-illuminated CMOS image sensor technologies[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(5): 3159-3164.
- [52] OGAWA I, KURIHARA K, UCHIDA S, et al. Image scanner[P]. US Patent, 1991, 4996604.
- [53] KO F J, SHIEH H P D. High-efficiency micro-optical color filter for liquid-crystal projection system applications[J]. *Applied optics*, 2000, 39(7): 1159-1163.
- [54] CHEN Q, CUMMING D R S. High transmission and low color cross-talk plasmonic color filters using triangular-lattice hole arrays in aluminum films[J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 14056-14062.
- [55] SHIMIZU T, INAMI T, TAKEGAWA H, et al. Color filters from pigment-dispersed photopolymers[J]. *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 1989, 2: 243-248.
- [56] GREGORY P. High-technology applications of organic colorants[M]. New York, Springer Science & Business Media, 2012: 97-105.
- [57] CHENG F, GAO J, LUK T S, et al. Structural color printing based on plasmonic metasurfaces of perfect light absorption[J]. *Scientific reports*, 2015, 5: 11045.
- [58] XU T, WU Y K, LUO X, et al. Plasmonic nanoresonators for high-resolution colour filtering and spectral imaging[J]. *Nature communications*, 2010, 1: 59.
- [59] XU T, SHI H, WU Y K, et al. Structural colors: from plasmonic to carbon nanostructures[J]. *Small*, 2011, 7(22): 3128-3136.
- [60] EBBESEN T W, LEZEC H J, GHAEMI H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, 391(6668): 667.
- [61] BOURGIN D G, BETHE, H A. Theory of Diffraction by Small Holes[J]. *Math. Rev.*, 1945, 6: 165.
- [62] OTTO A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection[J]. *Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei*, 1968, 216(4): 398-410.
- [63] WALLS K, CHEN Q, COLLINS S, et al. Automated design, fabrication, and characterization of color matching plasmonic filters[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(7): 602-604.
- [64] INOUE D, MIURA A, NOMURA T, et al. Polarization independent visible color filter comprising an aluminum film with surface-plasmon enhanced transmission through a subwavelength array of holes[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(9): 093113.
- [65] CHEN Q, CUMMING D R S. High transmission and low color cross-talk plasmonic color filters using triangular-lattice hole arrays in aluminum films[J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 14056-14062.

- [66] YOKOGAWA S, BURGOS S P, ATWATER H A. Plasmonic color filters for CMOS image sensor applications[J]. Nano Letters, 2012, 12(8): 4349-4354.
- [67] DIEST K, DIONNE J A, SPAIN M, et al. Tunable color filters based on metal? insulator? metal resonators[J]. Nano letters, 2009, 9(7): 2579-2583.
- [68] ZENG B, GAO Y, BARTOLI F J. Ultrathin nanostructured metals for highly transmissive plasmonic subtractive color filters[J]. Scientific reports, 2013, 3: 2840.
- [69] KAPLAN A F, XU T, JAY Guo L. High efficiency resonance-based spectrum filters with tunable transmission bandwidth fabricated using nanoimprint lithography[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(14): 143111.
- [70] XU T, WU Y K, LUO X, et al. Plasmonic nanoresonators for high-resolution colour filtering and spectral imaging [J]. Nature communications, 2010, 1: 59.
- [71] YOON Y T, PARK C H, LEE S S. Highly efficient color filter incorporating a thin metal-dielectric resonant structure[J]. Appl. Phys. Express, 2012, 5(2): 022501.
- [72] GANESH N, XIANG A, BELTRAN N B, et al. Compact wavelength detection system incorporating a guided-mode resonance filter [J]. Appl. Phys. Lett., 2007, 90(8): 081103.
- [73] DOBBS D W, GERSHKOVICH I, CUNNINGHAM B T. Fabrication of a graded-wavelength guided-mode resonance filter photonic crystal[J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 89(12): 123113.
- [74] CHEN P, LIANG R, HUANG Q, et al. Plasmonic filters and optical directional couplers based on wide metal-insulator-metal structure[J]. Opt. Express, 2011, 19: 7633.
- [75] ZHANG L, HAO J, YE H, et al. Theoretical realization of robust broadband transparency in ultrathin seamless nanostructures by dual blackbodies for near infrared light [J]. Nanoscale, 2013, 5(8): 3373-3379.
- [76] YOON Y T, LEE S S. Transmission type color filter incorporating a silver film based etalon[J]. Optics Express, 2010, 18(5): 5344-5349.
- [77] FREY L, PARREIN P, RABY J, et al. Color filters including infrared cut-off integrated on CMOS image sensor[J]. Opt. Express, 2011, 19, 13073.
- [78] LIU Y J, SI G Y, LEONG E S P, et al. Optically tunable plasmonic color filters[J]. Applied Physics A, 2012, 107(1): 49-54.
- [79] ROBERTS A S, PORS A, ALBREKTSEN O, et al. Sub-wavelength plasmonic color printing protected for ambient use[J]. Nano letters, 2014, 14(2): 783-787.
- [80] DEVLIN R C, KHORASANINEJAD M, CHEN W T, et al. Broadband high-efficiency dielectric metasurfaces for the visible spectrum[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(38): 10473-10478.
- [81] YANG B, LIU W, LI Z, et al. Polarization-sensitive structural colors with hue-and-saturation tuning based on all-dielectric nanopixels[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(4): 1701009.
- [82] CHO H, HAN S, KWON J, et al. Self-assembled stretchable photonic crystal for a tunable color filter[J]. Optics letters, 2018, 43(15): 3501-3504.
- [83] 冯延, 田楠, 王继成, 等. 基于可拉伸材料的动态调谐彩色滤波器[J]. 应用光学, 2019, 40(6): 1174-1180.
- FENG Y, TIAN N, WANG J C, et al. Dynamic tuning color filters based on stretchable materials[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(6): 1174-1180.
- [84] HE W, FENG Y, HU Z D, et al. Tunable sensors with multifold nanorod metasurfaces array based on hyperbolic metamaterials[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(4): 1801-1806.