

# 光学学报

## 面向高像素密度图像传感器的结构色技术

陈沁\*, 文龙, 杨先光, 李宝军

暨南大学纳米光子学研究院, 广东 广州 511443

**摘要** 近年来,各种微纳光学效应被用于实现结构色甚至更精细的光谱调控,但这类方法大部分都基于彩色滤波原理,其光学效率难以接近甚至超越传统的染料滤波技术。首先介绍高像素密度图像传感器的色彩技术需求,并分析现有商用染料滤波器和微纳光学结构色滤波技术的局限性,然后介绍一类新兴的微纳结构空间分光色彩管理技术,并系统性地分析和讨论其技术原理和发展现状,最后总结该技术面临的挑战和发展趋势。

**关键词** 光学器件; 亚波长结构; 微纳光学; 图像传感器; 结构色; 分束器

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0823010

## Structural Color Technology for High Pixel Density Image Sensors

Chen Qin\*, Wen Long, Yang Xianguang, Li Baojun

*Institute of Nanophotonics, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 511443, China*

**Abstract** In recent years, various micro-nano optical effects have been used to realize structural color and precise spectral control, but most of methods based on the micro-nano optical effect are based on the principle of color filtering, and the optical efficiency is lower than that of the traditional dye filtering technology. First, the requirements of color technology of a high pixel density image sensor are introduced, and the limitations of the commercial dye filter and micro-nano optical structural color filter technology are analyzed. Then, a new kind of micro-nano structure spatial spectral color management technology is introduced, and its technical principle and development status are systematically analyzed and discussed. Finally, the challenges and development trend of this technology are summarized.

**Key words** optical devices; subwavelength structure; micro-nano photonics; image sensor; structural color; splitter

**OCIS codes** 230.3990; 050.6624; 130.3120; 250.5403

### 1 引言

视觉是人类最为重要的感觉,人类所获取信息的 80% 以上来自于视觉。图像传感器则是延伸人类视觉功能的核心器件<sup>[1-2]</sup>,通过特殊光学元件的运用,可以实现光谱、偏振、相位甚至手性等多维物理量的可视化<sup>[3-5]</sup>,而通过特殊电学元件的运用,可以实现超高速光学过程的记录<sup>[6-7]</sup>。得益于微电子技术的发展,图像传感器替代胶片相机后,一直向着更

小像素和更大阵列规模的方向发展,以期获得更大的图像分辨率<sup>[8-9]</sup>。常规的图像传感器的像素尺寸已经减小到  $1\ \mu\text{m}$ <sup>[10-11]</sup>,商业数码相机市场已经推出了接近亿级像素规模的产品,航天航空应用中甚至有通过多幅图像拼接形成千亿像素图片的产品。从硬件上增加像素的一个直接方法就是增大图像传感器有源区的尺寸,例如增大用于弱光环境下生物成像显微镜中使用的制冷电荷耦合器件(CCD)的有源区尺寸。全画幅感光面积仅为  $36\ \text{mm} \times 24\ \text{mm}$ ,虽

收稿日期: 2020-06-29; 修回日期: 2020-07-14; 录用日期: 2020-07-31

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2203402)、国家自然科学基金(11774383, 11774099, 11874029)、广东省国际科技合作项目(2018A050506039)、广东省自然科学基金杰出青年基金(2020B1515020037)、广东省珠江人才计划(2019QN01X120)

\* E-mail: chenqin2018@jnu.edu.cn

然中画幅和大画幅的图像传感器具有更大的感光区,但成本急剧上升,这也限制了成像系统的小型化。另一个增加像素的方法就是在同样感光区域内集成更多的像素,这样可以控制成本和成像系统尺寸,然而更多像素意味着更小的像素尺寸,这会导致各种缩小的光学和电学元件性能退化,最终造成成像信噪比的快速下降,这就是同样像素规模的手机拍照和单反相机拍照体验存在差异的原因<sup>[12]</sup>。虽然可以通过把红(R)、绿(G)、蓝(B)三原色的探测器在垂直方向堆叠集成的方法在同样感光区面积里实现更多像素<sup>[13]</sup>,如索尼的 IMX586 图像传感器,但是色彩串扰和工艺复杂度限制此技术的广泛应用。通过可调谐色彩的时分技术也可以在同样感光区集成更多像素,但动态成像性能大幅下降<sup>[14]</sup>。

近年来,随着纳米技术的发展,微纳光学成为光学研究的一个热点分支<sup>[15-19]</sup>,纳米技术与光学技术的结合激发出各种新颖的光学效应并促进了众多新型光学功能元件的诞生,例如超透镜/超构透镜<sup>[20-23]</sup>、超分辨成像器件<sup>[24-26]</sup>、多维光存储器<sup>[27-29]</sup>等。在图像传感器像素持续减小的发展过程中,利用微纳光学技术发展适用于超小像素的彩色滤波器<sup>[30-34]</sup>、微透镜<sup>[35-37]</sup>和探测器<sup>[38-40]</sup>等,成为了一个全新的技术途径和发展方向<sup>[41]</sup>,其不仅在学术界掀起研究热潮,产业界如松下、索尼、三星等图像传感芯片制造巨头也都对其进行积极研发<sup>[42-45]</sup>。这种基于微纳光学的超小像素成像技术有望成为下一代图像传感芯片及其衍射产品的技术制高点<sup>[46]</sup>。微纳光学的优势之一在于可在提高器件集成度的同时保证较高的性能,微纳光学器件与图像传感器的结合更多面向的是智能手机、安防监控、物联网传感等需将体积、成本和性能兼顾的应用场景;而对于科研、国防、航天等不计成本的领域中像素尺寸高像素密度规模的应用场景不在本综述讨论的范围内。本文将围绕图像传感器中的色彩实现技术问题,主要介绍基于微纳光学的结构色技术,不同于以往的结构色综述论文<sup>[47-51]</sup>,本文将重点阐明现有微结构光学滤波器技术在图像传感器应用中的局限性,介绍一种新兴的微纳结构分光色彩管理技术的研究进展,并分析讨论技术面临的挑战和发展趋势。

## 2 超小像素图像传感器的色彩管理问题

常规互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器有正照式(FSI)和背照式(BSI)两种架构

[图 1(a)]<sup>[52-53]</sup>,两种架构都包括微透镜、彩色滤波器、填充层、金属互联层、抗反射层、钨网层和硅探测器等基本单元。其中,微透镜用于增大像素的进光量;彩色滤波器对入射到像素的光进行不同色彩波段的滤波;金属互联层用于像素信号的采集和控制电路,不同代工厂的不同工艺下会有多层金属互联层;填充层用于填平和绝缘各金属层结构;抗反射层用于降低硅探测器表面的反射;钨网层用于减少相邻像素的串扰;硅探测器用于光电转换,也可以是其他材料的探测器。BSI 与 FSI 的不同之处在于:金属互联层等电学元件与染料滤波器等光学元件分别位于硅探测器上、下两侧,从而避免金属互联层对入射光的遮蔽效应和光在金属互联层等多层结构中传输引起的串扰,目前高像素密度的 CMOS 图像传感器基本都是 BSI 架构。无论是 FSI 架构还是 BSI 架构,基本都采用如图 1(b)所示的 RRGB 的拜耳(Bayer)阵列排布方式来实现彩色成像<sup>[54]</sup>,这是一种空分技术,每一个  $2 \times 2$  的 RRGB 像元贡献一个彩色成像像点,其中这个像点色彩对应的 R、G、B 波段的强度分别由这 4 个像素提供<sup>[55]</sup>。如图 1(c)所示,随着像素规模的不断扩大,单个像素的尺寸从 2006 年的  $2 \mu\text{m}$  以上缩小到目前的  $1 \mu\text{m}$  以下,光通量下降了近 90%,这对于图像传感器的光学和电学设计与制备工艺提出了巨大的挑战<sup>[56]</sup>。

图像传感器中的色彩管理包括对宽光谱入射光的频谱裁剪和定向空间路由。染料滤波器是目前图像传感器领域内的主流色彩实现技术,其工作原理是基于有机材料的透射和吸收特性,即透射待测波段的光并吸收其他波段的光<sup>[57-58]</sup>。为了提高成像设备的稳定性和抗辐照性,并减小超小像素多步对准工艺的难度,近年来各种结构色技术被广泛关注,并被认为有望替代有机染料滤波器<sup>[59-61]</sup>。原则上,各种共振型的光学结构都具备光谱调控的作用,例如平面腔<sup>[43,62-64]</sup>、光栅波导<sup>[31,42,65-67]</sup>、金属微纳结构<sup>[30,32,33,44,68-71]</sup>等。如图 2 所示,通过调节结构参数(厚度、周期、宽度等)可以改变平面腔共振、导模共振、表面等离子激元共振、米氏共振等光学效应的条件,从而调节带通波长、通带宽度和透射率等各种性能参数。平面腔结构最为简单,如图 2(a)所示,不管是介质还是金属反射镜,都可以通过光在腔内的干涉形成波长选择性的透射以实现色彩调控,使得色彩纯度较高,而且利用介质反射镜结构还可以获得较高的透射率<sup>[72]</sup>。但这种结构的透射波长与腔内光程有关,在亚微米尺度下利用多步对准光刻来

制备多台阶结构的工艺难度较大。另外,利用灰度曝光工艺实现多台阶<sup>[64,73]</sup>或者在固定厚度下利用横向亚波长结构来调节腔内等效折射率<sup>[72,74]</sup>都可以调节平面腔的透射波长。不过前者的工业化应用还存在困难,后者难以实现大波长范围的调节。光栅波导利用光栅将入射光耦合到横向传输的波导模式中,以实现波长选择性透射,如图 2(b)所示,这种导模共振机制可以获得极窄的透射谱线和高透射

率,有利于提高色彩纯度,不过具有很灵敏的角度依赖性,其波导结构在一定程度上限制了器件集成中的材料结构选择<sup>[75]</sup>。近年来各类金属纳米结构成为了结构色方向的研究热点,如图 2(c)所示,传输表面等离子体共振、局域表面等离子体共振、超材料/超表面等都可以通过简单改变周期或横向尺寸来实现波长调谐,在结构实现的简易性方面具有一定优势,不过由于金属材料存在吸收损耗,这类结构

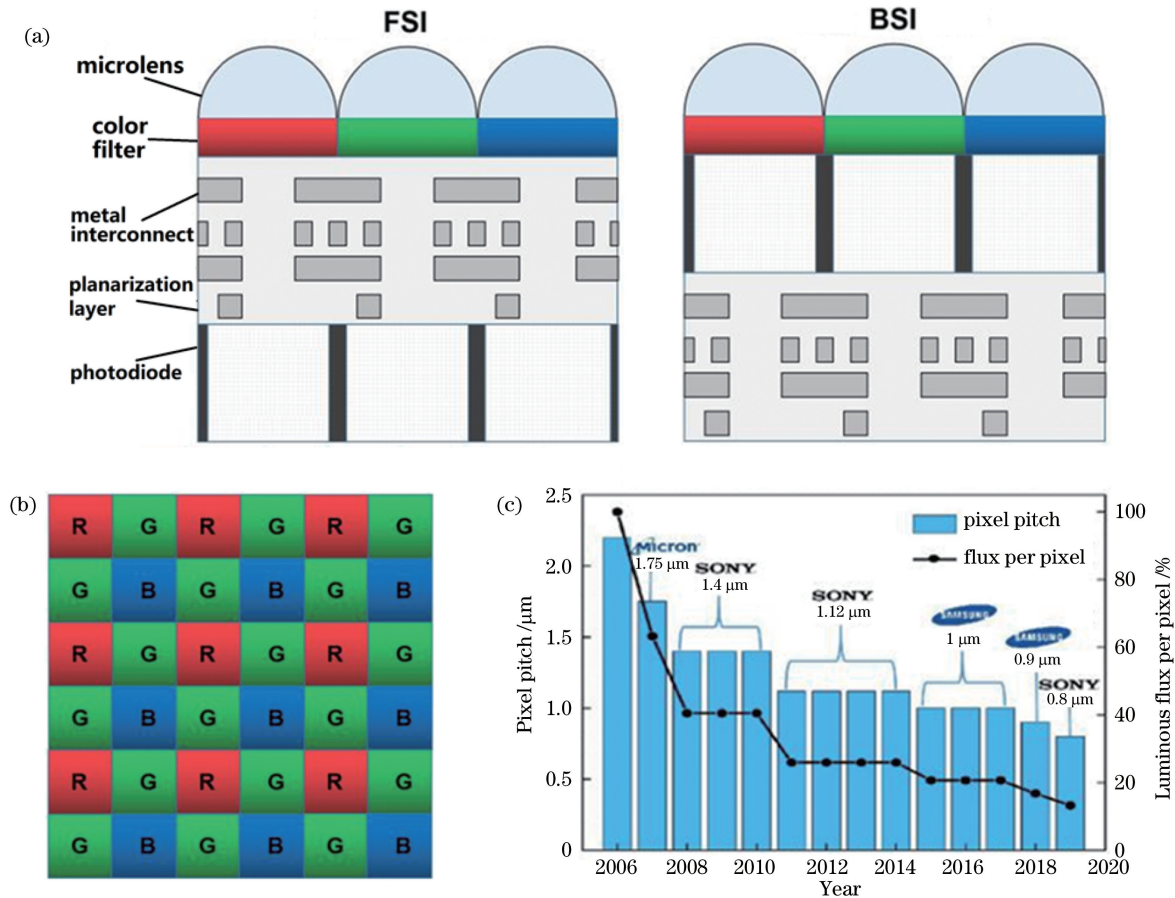


图 1 现有图像传感器技术<sup>[56]</sup>。(a)正照式和背照式 CMOS 图像传感器的剖面结构示意图;(b) Bayer 阵列示意图;(c)图像传感器像素大小和光通量的变化趋势

Fig. 1 Current image sensor technology<sup>[56]</sup>. (a) Diagrams of front-side illumination and back-side illumination CMOS image sensors; (b) schematic of Bayer array; (c) development trends of pixel pitch and luminous flux of image sensor

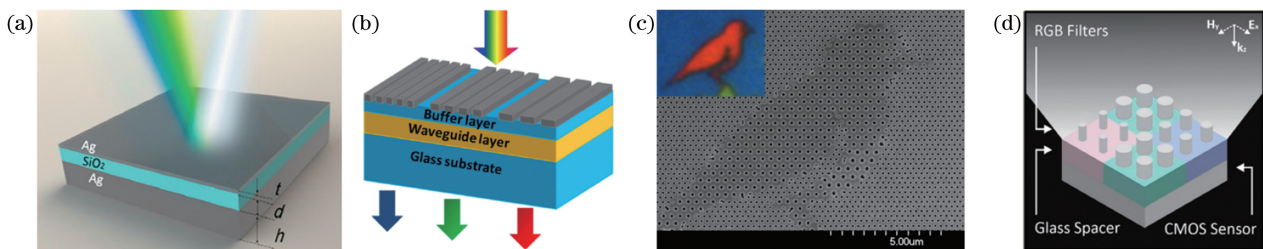


图 2 典型微纳结构彩色滤波器。(a)平面腔结构<sup>[63]</sup>;(b)光栅波导结构<sup>[31]</sup>;(c)金属纳米孔阵列结构<sup>[76]</sup>;(d)介质纳米结构<sup>[34]</sup>

Fig. 2 Typical color filter with micro-nano structure. (a) Structure of planar cavity<sup>[63]</sup>; (b) structure of grating waveguide<sup>[31]</sup>; (c) structure of metal nanohole array<sup>[76]</sup>; (d) dielectric nanostructures<sup>[34]</sup>



色滤波器的透射率较低且通带较宽。近年来,介质纳米结构也引起了关注[图 2(d)],因为它相比于金属纳米结构具有明显的低损耗特征,而且通过米氏共振也能实现波长的选择。

实际上,从当前图像传感器的架构特点来考虑,上述结构色机制在应用中都面临着严重的问题,比如尺寸效应<sup>[44,77-78]</sup>。虽然有文献报道在  $1\ \mu\text{m}$  大小范围内结构色技术就能实现一定程度的色彩表现,但往往在亮度和纯度方面的性能急剧下降。不仅如此,现有染料滤波器的发展已经非常成熟,性能几乎发挥到了极致,例如富士公司推出的一款染料滤波器的峰值透射率已经超过了 90% 而且串扰小<sup>[57]</sup>,这是上述所有结构色机制都难以达到的。因此,仅考虑基于现有微纳光学结构的滤波技术来直接代替染料滤波器是不可能满足图像传感器的发展需求的。为了提高像素单元的信噪比以适应像素尺寸不断缩小的应用需求,需要提高光学效率、提高光电转换效率、抑制噪声,并解决各类元件在尺寸缩小后的工艺问题等,尤其需要充分利用入射光,这是所有成像光通量的来源。然而,不管是染料滤波器还是上述各种微纳结构滤波技术,在现有图像传感器的色彩管理模式下的光学效率都非常低。如图 1(b)所示,在一个 RGGB 的成像单元中,空间光路由方式是滤波器与探测器单元一一对应的模式,4 个像素分别接收  $1/4$  面积入射的光通量,经染料滤波器的色彩选择后,光进入探测器中。因此,即使假定入射光在图像传感器中传输时没有损耗,每个像素也仅有 25% 的光学效率,大部分的光被染料滤波器吸收。补色机制的成像方案可以在一定程度提高光通量,但色彩表现会下降<sup>[69]</sup>。可见,目前图像传感器的低光学效率是由材料吸收型的彩色滤波机制导致的,而上述微纳光学结构滤波技术也工作在带通机制下,因此有同样的光学效率上限。

除了采用基于材料吸收或结构共振的滤波技术,实际上采用空间色散也可以获得色彩的管理,如天空的彩虹和棱镜的分光,这种情况下不同波长的光是被折向不同的方向而不是被反射或吸收,因此光学损耗可以大幅降低。显然,棱镜和两向色分束镜都是不利于实现片上集成的。德国学者 Dammann<sup>[79]</sup>提出了一种可集成的色彩分离光栅的技术原理,利用多台阶光栅实现将 R、G、B 三原色分别衍射到 +1、0、-1 级方向的相位分布。如果在图像传感器中将一个 RGGB 成像单元内所有的入射光按波段分别导向对应的 R、G、B 像素,理论上的光

学效率可以接近 100%。因此,类似 Dammann 光栅技术思想,利用微纳光学方法进行多波段的像素级空间光路由是提高图像传感器成像单元信噪比的潜在技术方案。

### 3 微纳光学彩色分光技术

微纳光学彩色分光技术的重点是按需要进行空间光路由的优化,而空间光路由主要决定于三维空间折射率的分布。微纳光学结构具有纳米尺度的空间折射率调控能力,因而可获得极大的设计自由度。光栅衍射、表面等离激元金属纳米结构、介质纳米天线和超表面/超材料等都能够基于传输相位设计并通过传输相位、几何相位和共振相位等方式来调控光束波前,从而获得光束空间色散。下面分别介绍各种技术的机制及其发展现状,并分析讨论其优缺点。

#### 3.1 光栅衍射彩色分光技术

光栅是一种常见的光学元件,由大量等宽、等间距的平行狭缝构成。基于光栅衍射效应的分光机制已经被广泛应用到光谱仪的设计中,不同波长光的传输相位差异导致其在空间上的色散,从而获得了分波段处理光信息的能力<sup>[80]</sup>。闪耀光栅就是一种常见的衍射光栅,利用锯齿形的光栅结构将入射光集中在一级衍射中。如图 3(a)所示,将闪耀光栅和透镜相结合就可以使得不同波长的入射光会聚到透镜焦平面不同的位置,通过进一步将此技术扩展到微透镜阵列和焦平面探测器阵列的组合体系中,就能实现高光效的多波段成像<sup>[81]</sup>。闪耀光栅是在同一衍射级将不同颜色的光在空间分开,光栅周期越小则色彩的空间分离程度越大,但同级衍射的空间色散依然有限。1978 年 Dammann<sup>[79]</sup>提出了色彩分离光栅技术思想,不同于二元光学闪耀光栅,这里每个光栅台阶的高度更高并使得每个台阶厚度对于波长  $\lambda_0$  形成  $2\pi$  的相位变化。如图 3(b)所示, $\lambda_3$  的波前为平面,形成 0 级衍射极大,而更长的  $\lambda_1$  或者更短的  $\lambda_2$  波长经历的相位变化不同,在满足  $\pm 1$  级衍射条件时,将分别在 +1 和 -1 级获得衍射极大,从而实现不同波长在不同衍射级的空间分光,这比闪耀光栅在同级衍射内的分光更加有效。受限于早期的加工技术水平,Dammann 将两个具有等周期 ( $60\ \mu\text{m}$ ) 和不同深度 ( $2\sim 5\ \mu\text{m}$ ) 的二元光栅进行对准集成以实现三台阶结构,通过优化光栅结构参数来满足 R、G、B 三波段分别在 +1、0 和 -1 级主衍射的相位梯度需求,获得了 60% 以上的空间彩色分光



效率。1993 年美国学者 Farn 等<sup>[82]</sup>采用同样的原理制备了 16 μm 周期的四台阶结构,展示了 R、G、B 三原色超过 70% 以上的空间分光效率。1999 年英国学者 Layet 等<sup>[83]</sup>将 Dammann 的色彩分光光栅技术应用到彩色显示中,通过将 R、G、B 三原色分光需要的 Dammann 光栅周期进行排列,获得 80% 的光学效率[图 3(c)],其中子像素尺寸为 80 μm,光栅周期为 4~5 μm,显示工作距离为 1 mm。

可以看到,早期研究中彩色分光光栅的周期都在数微米以上,而且都是通过微米级厚度的多台阶来获得毫米级工作距离下的平面相位延迟分布。考虑到现有图像传感器的像素尺寸即将进入亚微米尺度,而且微透镜与探测器的距离在数微米,上述技术方案都无法得到直接应用。最近日本电报电话 (NTT) 公司提出了一种基于纳米介质结构的超薄衍射分光结构,并在 1.43 μm × 1.43 μm 像素尺寸

的图像传感器上进行了原理性展示<sup>[84]</sup>。不同于传统技术中利用多台阶的传输相位来构建波前相位分布,这里利用不同横向尺寸的纳米介质柱中的导模模式折射率的差异来实现相位延迟。如图 3(d) 所示,利用横向边长分别为 125 nm 和 295 nm、高度为 615 nm 的两根方形 SiN,在 1.2 μm 周期内获得了类似 Dammann 光栅的相位延迟分布,分别针对 430, 520, 635 nm 波长的三原色光形成 -1, 0 和 1 级的主衍射。这种光路由方案获得了 W+B (W 代表白光)、G 和 W+R 三类光通量的空间分布,通过与探测器阵列单元一一对应,形成了 W+B、G 和 W+R 三类像素,理论上平均光通量得到超过 3 倍的提高。这种提升对于微光环境成像和未来的超小像素器件都具有重要作用,从图 3(d) 可以看到,利用衍射进行色彩分离获得的彩色图像信噪比明显优于传统的染料滤波技术。

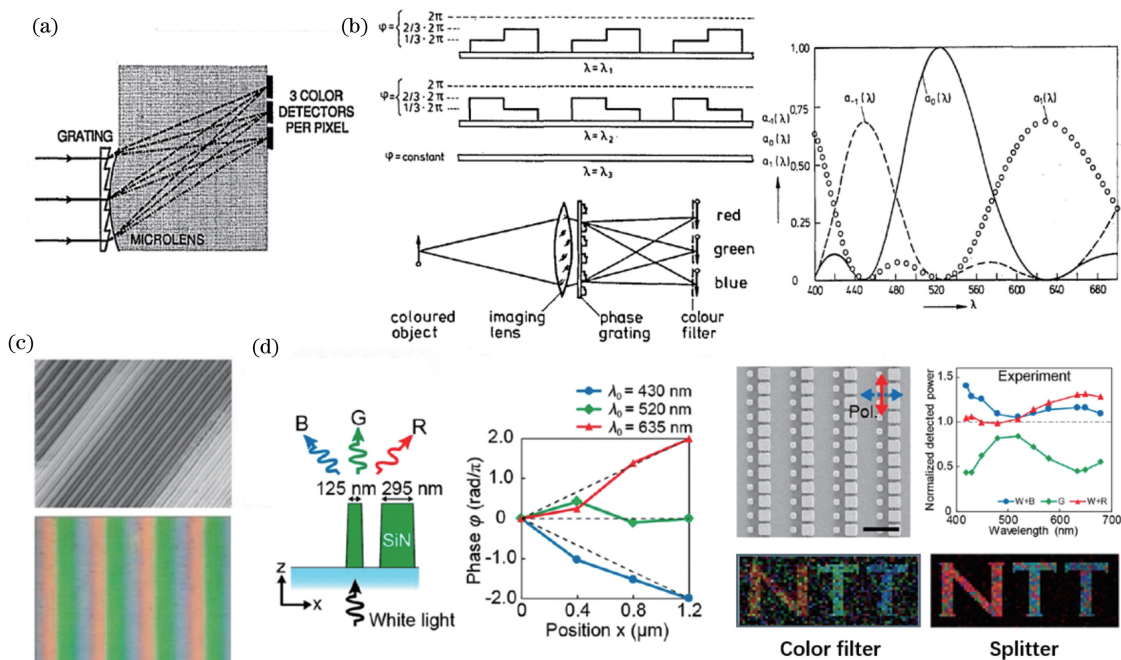


图 3 典型光栅衍射彩色分光技术。(a) 闪耀光栅和微透镜组合的分光技术<sup>[81]</sup>; (b) 色彩分离光栅技术<sup>[79]</sup>; (c) 色彩分离光栅的扫描电子显微镜和光学显微照片<sup>[83]</sup>; (d) 介质纳米柱形成的色彩分离光栅<sup>[84]</sup>

Fig. 3 Typical color rendering technique based on grating diffraction. (a) Color rendering technique based on blazed gratings and microlens<sup>[81]</sup>; (b) color rendering by Dammann gratings<sup>[79]</sup>; (c) scanning electron microscope and optical microscopic images of color rendering by Dammann gratings<sup>[83]</sup>; (d) color rendering grating with dielectric nanorod structures<sup>[84]</sup>

综上所述,光栅衍射彩色分光技术的基本原理很明确,无论是传统的多台阶相位调控技术还是近年来兴起的纳米柱相位调控技术,都是基于利用平面内结构优化获得的不同波长的光在不同衍射级发生主衍射的相位需求。微纳光学技术的发展使得衍

射相位的调控不再单纯地依赖厚度调节,而是利用横向结构的变化来调控模式的等效折射率,从而可以获得超薄的彩色分光结构,利于一次图形化制备。不过利用微纳结构同时满足如图 3(d) 所示的三个波长的空间线性相位分布,对设计和加工都具有挑

战性。

### 3.2 表面等离子体共振彩色分光技术

表面等离子体共振是在金属表面的自由电子和光子相互作用形成的电磁振荡,其极小的波长和超强的光场局域使得光学研究进入纳米尺度<sup>[85-87]</sup>。表面等离子体共振结构色由于其丰富的物理内涵和超小的结构尺寸,近年来得到广泛关注<sup>[48-49,88]</sup>。实际上,早在 19 世纪末 20 世纪初物理学家 Faraday<sup>[89]</sup> 和 Mie<sup>[90]</sup> 就分别研究了金属纳米颗粒产生色彩的机制,将此过程归结为金属纳米颗粒的局域表面等离子体共振吸收。同频率的表面等离子体波具有比空间电磁波更大的波矢,通常需要通过光栅和棱镜来辅助实现波矢匹配,通过改变入射光角度、光栅周期、折射率环境等条件就能激发出不同频率的表面等离子体共振。2011 年 Ozaki 等<sup>[91]</sup> 基于棱镜耦合激发和光栅耦合辐射的两级效应展示了白光照明下的彩色全息成像技术,其技术关键就是利用三个特定角度入射的白光照射在棱镜表面金属膜覆盖的全息结构,从而分别激发 R、G、B 三色对应的表面等离子体波并将其由光栅耦合辐射出来,最终通过叠加形成彩色全息图像。

异常透射(EOT)是表面等离子体光学中的一个重要现象。1998 年法国学者 Ebbesen 等<sup>[92]</sup> 发现金属薄膜上的纳米孔阵列具有高于孔区域占空比的透射率,并认为这种透射增强现象是周期结构中表面等离子体波引起的共振透射。基于这种共振透射现象并通过调节材料结构参数实现全色彩选择,获得了 CMOS 图像传感器芯片上的直接像素级集成<sup>[59,76,93-94]</sup>,但受限于通带外的能量损失,这种技术并不利于应用在高像素密度图像传感器中。如前所述,在激发出波长相关的表面等离子体共振的基础上,实现有效的空间光路由是图像传感器应用中的关键。利用金属周期结构的布拉格衍射,可以有效地在平面内进行表面等离子体波的路由和复用/解复用,进而通过优化金属纳米孔阵列在不同方向的晶格常数,获得不同波长的光耦合到表面等离子体波后在平面内不同路径的传输<sup>[95]</sup>。结合 EOT 效应和布拉格衍射,Lezec 等<sup>[96]</sup> 在 2002 年报道了一种三维的彩色分光技术,如图 4(a)所示,通过在 300 nm 厚的银膜上刻蚀出一条 40 nm 宽的条形孔,然后在银膜的两个面都刻蚀出周期浅槽结构,并利用周期结构布拉格衍射的波长选择性及其辅助表面等离子体波与光的耦合,分别在 0°和 30°方向获得 580 nm 和 800 nm 波长光的偏折,从而以不同出射角收集的

光谱也可以看到透射峰波长随出射角的变化。这种机制不仅对于透射光具有空间彩色分光作用,对于填充在中心纳米孔的荧光染料的发光同样具有波长选择性的空间分光效果,不同染料分子的荧光在这类微纳结构的调控下分别被辐射到不同方向<sup>[97]</sup>。这里的周期浅槽结构不仅提供了光与表面等离子体耦合的匹配波矢,而且具有一定的天线作用,能将条形孔两侧入射光收集起来。基于这种天线效应,Laux 等<sup>[98]</sup> 提出了一种有望在图像传感器中提升光通量的彩色分光技术方案,如图 4(b)所示,通过结合金属纳米孔的 EOT 效应和环形金属周期纳米槽的天线效应,使得纳米孔的实际光通量由纳米槽的覆盖面积决定。通过研究发现相互叠加的纳米槽在一定优化结构中可以实现较小的光串扰,即不同周期的纳米槽天线可以将重叠区域的不同波长入射光分别耦合到不同频率的表面等离子体波并导引到不同纳米孔,进而由下面集成的探测器阵列实现透射光的光电信号转换,这样也压缩了器件尺寸,有利于提高像素规模。

Yagi-Uda 天线是广泛应用的微波天线,具有定向发射的特性,利用各种金属纳米结构构建表面等离子体 Yagi-Uda 纳米天线或其衍生天线结构引起了研究人员广泛的研究兴趣<sup>[99]</sup>。研究发现利用金属纳米天线的表面等离子体共振能够实现空间相位的调控,这种共振附加的空间相位梯度甚至改写了菲涅耳折射定律,实现了异常折射和基于平面结构产生涡旋光的新奇现象等<sup>[100]</sup>。基于这种共振引起的相位,瑞典学者 Shegai 等<sup>[101-102]</sup> 将彩色分光发展到了深亚微米的尺度,如图 4(c)所示,当金纳米盘和银纳米盘间距缩小到 10 nm 量级时,入射的蓝光和红光分别折向了银纳米盘和金纳米盘的两侧,从而获得了超紧凑( $\lambda^3/100$ )的彩色分光器。这个现象是由于金属材料在 400~500 nm 间出现带间跃迁,在不同金属纳米盘的表面等离子体共振波长两侧的波段出现了相反的相移。这种非对称性引起的光传输过程中的附加相位在各向异性光散射和光路由中被广泛关注<sup>[103-104]</sup>。如图 4(d)、(e)所示,研究人员分别利用组合结构的非对称性以及材料结构的双非对称性,展示了 O 波段(1310 nm)与 C 波段(1550 nm)的反向分光<sup>[105]</sup>,以及红光与蓝光的正交分光<sup>[106]</sup>。实际上,利用单个非对称结构如 V 型金属纳米天线也可以实现定向散射<sup>[107]</sup>,通过改变天线臂长和夹角等结构参数来调节偶极子模式和四极子模式的 Fano 共振,从而获得定向散射所需要的



相位条件。Zhuo 等<sup>[108]</sup>将纳米天线彩色分光应用到了单金属纳米棒结构,如图 4(f)所示,不同于非对称的 V 型天线,这种长径比的金属纳米棒支持纵向多极子的表面等离子体共振模式,其中奇对称的模

式远场辐射集中在中心方向,而偶对称的模式远场辐射集中在斜向,因此在白光照明下看到的金属纳米棒就呈现出了 G-R-G 的分段色彩,每个色块尺寸达到了 100 nm 的量级。

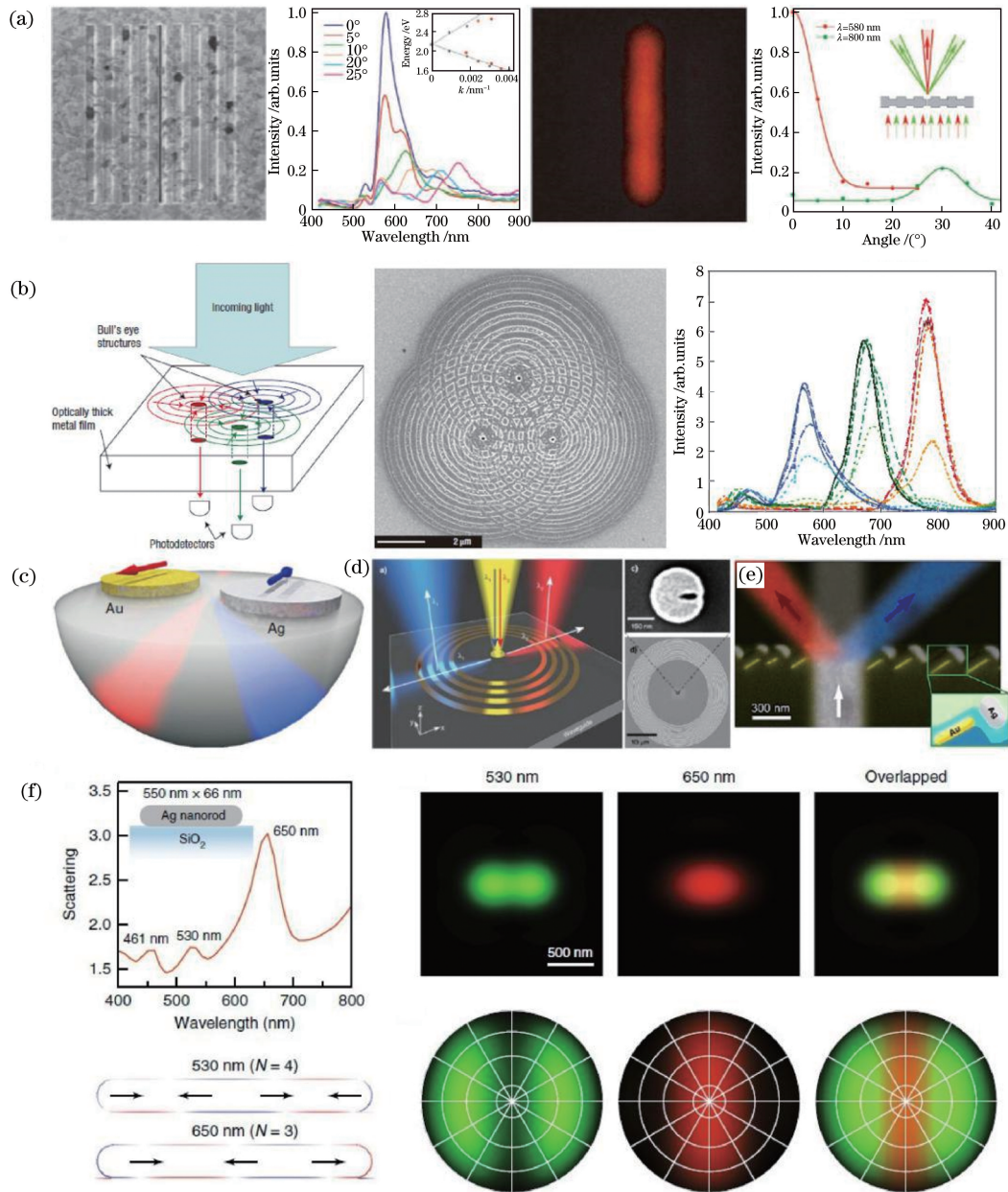


图 4 典型表面等离激元彩色分光技术。(a)金属狭缝分光结构<sup>[96]</sup>;(b)空间重叠牛眼结构<sup>[98]</sup>;(c)耦合金属纳米盘结构<sup>[101]</sup>;(d)非对称金属纳米圆盘和金属纳米圆环耦合结构<sup>[105]</sup>;(e)正交金银纳米棒结构<sup>[106]</sup>;(f)单金属纳米棒结构<sup>[108]</sup>

Fig. 4 Typical color rendering technique based on surface plasmon. (a) Beam rendering structure with metal slit<sup>[96]</sup>; (b) spatially overlapped subwavelength Bull's eye structure<sup>[98]</sup>; (c) coupled metal nanodisks<sup>[101]</sup>; (d) coupling structure of asymmetrical metal nanodisks and metal nanoring<sup>[105]</sup>; (e) orthogonal gold and silver nanorods<sup>[106]</sup>; (f) single metal nanorod<sup>[108]</sup>

综上所述,表面等离激元彩色分光技术具有丰富的物理内涵,基于光栅波矢耦合的天线聚光效应、附加共振相位的纳米天线折光效应以及模式对称性

差异导致的远场定向辐射,都赋予了彩色分光极大的设计自由度。而且得益于表面等离子体波特有的大波矢,表面等离激元彩色分光技术可以获得极小



尺度下的彩色分光,集成度超越了其他技术。除了电子束曝光等标准的平面化工艺,化学合成等方法也丰富了表面等离子激元彩色分光技术实现的工艺途径。需要注意的是,目前报道的表面等离子激元结构与图像传感器集成的工作都是基于波长选择性滤波机制<sup>[44,76,94,109-110]</sup>,尚无具有增益效果的折光方案的报道。此外,表面等离子激元彩色分光技术的发展瓶颈是金属材料固有的损耗问题。

### 3.3 超表面彩色分光技术

光学超表面是近 10 年来微纳光学研究的前沿热点,利用平面内特征尺寸远小于波长的微纳结构实现对光波的幅度、偏振、相位和手性等特性的调控,获得了诸如平面透镜<sup>[20-22]</sup>、隐身<sup>[111]</sup>和超分辨率成像<sup>[25-26]</sup>等所无法具备的各种新奇光学操控功能。类似 3.1 节中的纳米柱和 3.2 节中的金属纳米棒,超表面结构特征引发的附加相位赋予了超表面在彩色全息<sup>[112]</sup>、结构色<sup>[113]</sup>和光路由<sup>[114]</sup>等方面的重要应用价值。

折射元件(光学透镜)和衍射元件(光栅)是空间光路由的典型元件,这些传统光学元件通常利用弯曲或周期变化的折射率界面来调控波前,从而实现光束聚焦或偏折等功能。由于同一光学元件材料对于不同波长的光通常具有不同的折射率,而且传输途径中不同波长的光也具有不同光程差,这些色散造成了光学元件的色差,因此传统光学成像系统需要采用各种技术手段来消色差,例如超消色差透镜中集成了多种材料以获得在多个波长处完全的零色差<sup>[115]</sup>。相比之下,超表面器件(如超透镜)利用亚波长尺度结构化平面内的传输相位<sup>[116-117]</sup>、共振相位<sup>[118-120]</sup>或几何相位<sup>[22,121-122]</sup>来调节平面的相位分布,从而获得超紧凑的光束路由功能。虽然几何相位理论上是与波长不相关的,但超透镜中依然存在材料色散、传输光程差和结构色散等。不过超表面的大设计自由度和多相位机制也给消色差技术带来了更多的技术途径,通过优化设计超表面的结构共振相位可补偿光传输过程中不同波长的相位差。Aieta 等<sup>[123]</sup>展现了 1300,1550,1800 nm 三个波长消色差的光聚焦和光束偏转。类似地,通过在超透镜一个周期结构中引入耦合相移单元<sup>[124]</sup>或者集成共振单元<sup>[125]</sup>,可在红外和可见光等多个波段都获得宽光谱范围内极低的色差。利用超透镜阵列还进一步获得了消色差的场光成像<sup>[22]</sup>。

实际上,通过结构设计可以获得优于光栅和棱镜的超色散超表面结构<sup>[126]</sup>,实现波长相关的高效空间光路由,所设计结构可应用于光谱仪或者图像

传感器。从图 1(b)所示的图像传感器的 Bayer 阵列架构考虑,在一个 RGG 成像单元内需要集成一个多焦点的超透镜,以对入射光中 R、G、B 分量同时进行聚焦和分光。色散超表面不仅依赖结构本身的色散,也需要针对不同目标波长定制空间相位分布,以进一步提高彩色分光能力。面临的技术问题就是如何将多波长多焦点的相位需求融合到一个超透镜结构中。目前主要有两类方案:1)超元胞法<sup>[127-128]</sup>,该方法将满足不同波长在不同空间位置聚焦的相位分布需求的纳米结构作为子元胞进行空分复用,将其组合成具有多相位功能的超元胞;2)交错相位阵列法<sup>[129]</sup>,该方法将对不同波长在不同空间位置聚焦的相位分布按优化的占空比进行离散化抽样并通过交错组合形成完整的相位阵列。如图 5(a)所示,Wang 等<sup>[127]</sup>针对 R、G、B 三原色选择了三个不同尺寸的纳米柱,并基于几何相位机制设计出在空间错开分布的三色全息图像的相位分布,通过将不同尺寸的纳米柱组合形成超元胞,并将代表不同相位的超元胞按相位分布进行排列,实现了清晰的三色全息成像。这里的几何相位虽然是和波长无关的,不同颜色的全息图案会在空间重叠,但由于所选三个纳米柱分别在 473,532,633 nm 达到衍射效率极大值且衍射效率差异很大,因此实现了多波长无色散的清晰成像。基于同样的超元胞结合几何相位的思想,Zang 等<sup>[130]</sup>实现了偏振编码的双色全息成像<sup>[130]</sup>,Guo 等<sup>[128]</sup>则展示了单波长 9 个焦点以及三波长 4 个焦点的超透镜设计。针对图像传感器的应用,Chen 等<sup>[131]</sup>制备了 430 nm(B),532 nm(G)和 633 nm(R)三波长复用的 GaN 超透镜(焦距 110  $\mu\text{m}$ ),如图 5(b)所示,每个超元胞包括 4 个满足 B 相位要求的纳米柱、4 个满足 R 相位要求的纳米柱和 8 个满足 G 相位要求的纳米柱,在 50  $\mu\text{m}$   $\times$  50  $\mu\text{m}$  的超透镜尺寸下获得了 38.33%(B)、37.86%(G1)、27.56%(G2)和 15.9%(R)的聚光效率。相比之下,非复用的单个超透镜的光学效率分别为 61.2%(B)、71.3%(G1)、36%(G2),聚光效率降低的原因是存在串扰和有效数值孔径的减小。对于基于共振相位的纳米结构,同样可以利用超元胞法获得多波长的空间分光<sup>[113]</sup>,如图 5(c)所示,这种 Fano 共振辅助的突变相位发生在共振波长,因此具有波长选择性,通过构建 Ag-SiO<sub>2</sub>-Ag 三层结构,并在顶层 Ag 中进行超元胞阵列的排布,实现了 532 nm 和 660 nm 的空间分光,但光学效率仅为 5%。超元胞法中,元胞尺寸增大会造成数值孔径减小,从而影

响成像分辨率。在同样的物理尺寸条件下,交错相位阵列法可以保证每个波长对应的超透镜的数值孔径不会因为多波长的集成而变小。如图 5(d)所示,针对 480,550,620 nm 三个波长分别设计基于几何相位的超表面结构并进行像素化,然后对这些离散的微结构相位单元进行随机的交错排列组合,得到了最终的多波长多焦点的超透镜,得益于交错排列机制,每个颜色光的等效数值孔径都达到了 0.43<sup>[129]</sup>。需要注意的是,相比超元胞法,交错相位阵列法的光学效

率会随着复用波长数的增加快速下降。

不管是超元胞法还是交错相位阵列法,都存在单元间耦合以及多波长复用造成的有效相位阵列面积减小的问题。针对此问题,Zhou 等<sup>[132]</sup>展示了一种双层结构的超透镜,如图 5(e)所示,它由两个分别镶嵌在聚二甲基硅氧烷中的非晶硅纳米柱超表面结构对准贴合而成。双层纳米柱阵列结构提供了更大的设计自由度和更好的相位调控能力,每个波长的相位延迟由两层结构的贡献之和决定。直径为

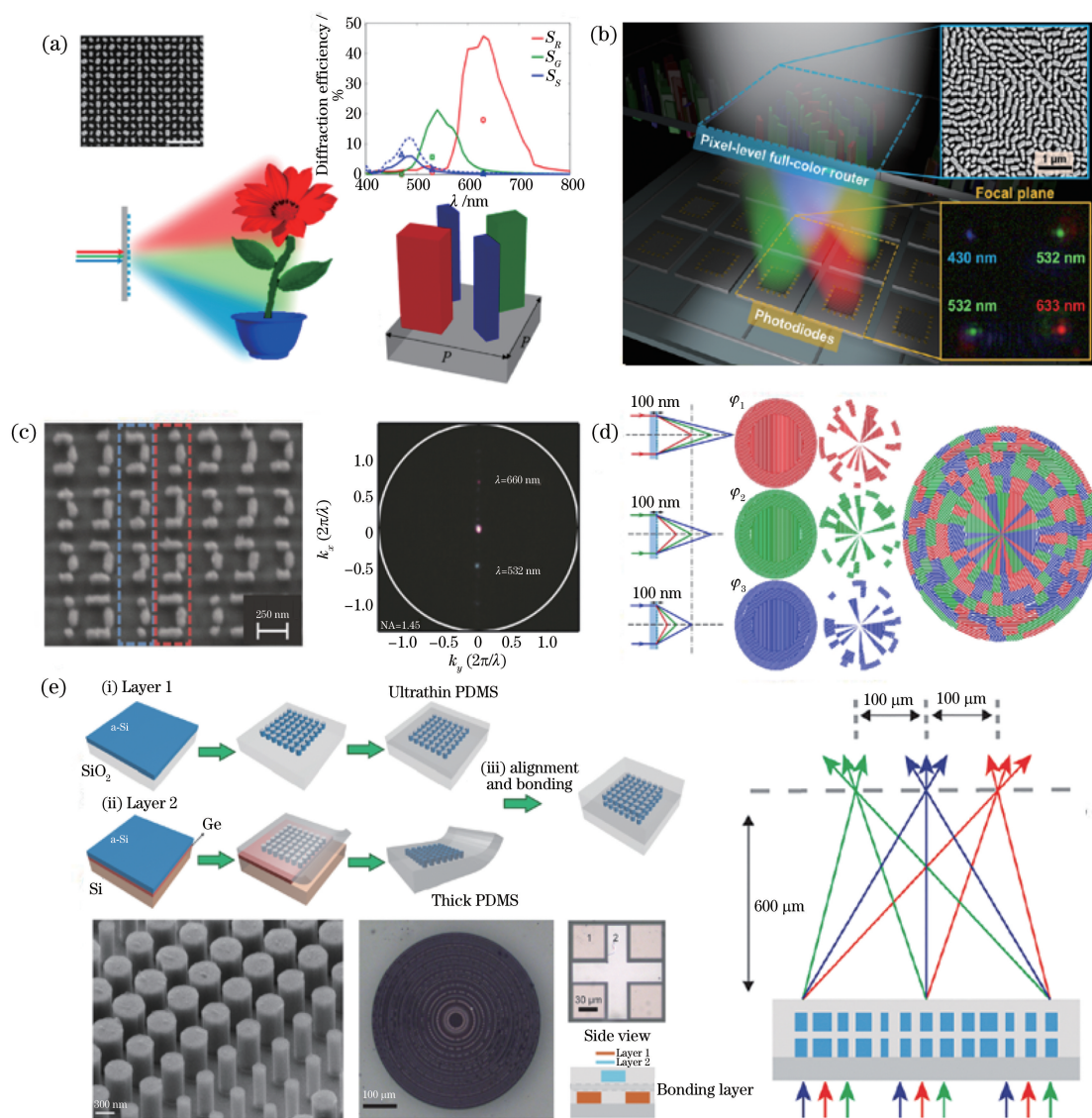


图 5 超表面彩色分光技术。(a)彩色超表面全息成像<sup>[127]</sup>; (b)基于超元胞法的 RGGG 单元 4 焦点聚焦的超透镜<sup>[131]</sup>; (c)基于超元胞法的 RGB 单元 3 焦点聚焦的超透镜<sup>[113]</sup>; (d)基于交错相位阵列法的 RGB 单元 3 焦点聚焦的超透镜<sup>[129]</sup>; (e)基于双层超透镜的 RGB 空间 3 焦点聚焦<sup>[132]</sup>

Fig. 5 Typical metasurface color rendering techniques. (a) Colorful metasurface hologram imaging<sup>[127]</sup>; (b) metalens with four foci for RGGG unit cell based on supercell method<sup>[131]</sup>; (c) metalens with three foci for RGB unit cell based on supercell method<sup>[113]</sup>; (d) metalens with three foci for RGB unit cell based on staggered phase array method<sup>[129]</sup>; (e) focusing of three foci in RGB space based on double layer metalens<sup>[132]</sup>



500  $\mu\text{m}$  的双层超透镜在 3  $\mu\text{m}$  对准精度的条件下展示了 1180 nm 和 1680 nm 的双波长聚焦, 焦斑的半峰全宽分别为 1.74  $\mu\text{m}$  和 2.57  $\mu\text{m}$ , 聚光效率分别达到 38% 和 52%。

综上所述, 超表面彩色分光技术相比于光栅衍射和表面等离子激元两类分光技术的显著特点是具有同时聚焦和分光的功能, 因此在高像素密度图像传感器应用中具有巨大优势。类似于光栅衍射和表面等离子激元分光机制, 超表面彩色分光技术通常是针对特定波长设计的, 在成像应用中需要对多波段的入射光进行调控, 现有的空间复用会引起单元结构间的耦合并带来光学效率退化的问题, 而且会造成超表面结构横向尺寸较大, 因此还需要进一步优化其在高像素密度图像传感器中的应用。

### 3.4 介质纳米天线彩色分光技术

金属纳米结构具有极强的光场局域特性, 然而金属材料固有的吸收损耗使得无论是表面等离子激元还是超表面的金属基光学元件, 光学效率都非常低<sup>[133-134]</sup>。近年来, 介质天线和介质超材料成为了研究热点, 展现了很高的光学效率<sup>[122, 135-136]</sup>, 有利于实现高像素密度的图像传感器。不同于 3.1 节中图 3(d) 展示的基于 Dammann 分光光栅原理的介质纳米结构和 3.3 节中展示的基于相控阵原理设计的介质超表面, 本节介绍的介质纳米天线主要依赖于单个纳米结构的散射特性<sup>[137]</sup>。

纳米结构的散射是一种固有的对波长敏感的光学传输行为。将介质纳米柱放置在图像传感器临近像素的界面上方, 通过其波长相关的散射与纳米柱层的等效抗反射效应的结合可获得一定的方向性光路由<sup>[138]</sup>。相对于这种较随机的纳米天线设计, 比利时微电子研究中心 (IMEC) 提出了一种基于模式耦合的 V 型非晶硅纳米天线分光技术<sup>[139]</sup>, 如图 6(a) 所示, 在白光照射下单个 V 型天线分别将 R、G、B 三色光折向了不同的方向。相比于 3.2 节介绍的 V 型金属天线和金纳米棒, 这种非对称介质天线不仅具有低损耗的特性, 还通过打破结构对称性支持面外偏振磁偶极子模式和面内偏振电四极子模式, 其耦合附加相位对波长的敏感性为实现三色光的分光提供了基础。通过对比发现介质 V 型天线具有与金属 V 型天线相当的分光方向性, 而且散射强度提高了近 30 倍。不过这个分光依赖于模式耦合, 仅在 650~750 nm 波长范围内实现了波长相关的路由。

日本松下公司对这种介质纳米天线分光技术进

行进一步改进, 实现了在图像传感器内部的集成验证<sup>[145]</sup>。如图 6(b) 所示, 通过采用不同的对称 SiN 纳米条, 分别对红光和蓝光进行偏折, 从而获得 W $\pm$ R 和 W $\pm$ B 等像素, 并利用标准的微电子工艺将 SiN 分光纳米条集成到 1.43  $\mu\text{m}$  像素的 CCD 图像传感器 (MN34570, Panasonic) 中。从光电压谱测试结果来看, 采用介质纳米天线分光后每个像素的光电信号得到显著增强, 从而提高了成像的亮度, 但光谱串扰更为严重。韩国三星公司基于类似思想提出了在染料滤波器上方集成介质纳米天线的技术方案并申请专利, 在这个架构中天线用来将入射光最大限度地导引到对应的像素, 而染料滤波器用来抑制分光带来的串扰, 这个组合在提高光学效率同时保证了原有的色彩纯度<sup>[140-141]</sup>。

从前面介绍的微纳结构分光技术来看, 当光学结构进入亚微米甚至纳米尺度后, 简单的光线光学理论已经不再适用, 不管基于哪个原理的分光技术设计都是基于一定的物理分析, 然后在一个初始模型上采用有限差分或有限元等电磁场数值仿真算法来进行结构参数优化, 这种优化往往仅能获得局域最优解, 成为微纳光学技术在实际工程应用中面临的一个难题。不仅如此, 类似彩色分光这种对空域和频域都有多变量技术需求的设计任务对于常规的物理直觉型的设计思路甚至具有强大搜索能力的基因算法都是一种挑战, 相关设计难以真正满足追求极致综合性能的工程应用。逆向设计方法因能对全参数空间进行高效优化, 最近成为了微纳光学领域的热点研究课题<sup>[142-144]</sup>, 这种方法类似于计算全息中的相位板设计, 从目标功能和光学性质出发, 原则上可以获得全参数空间的最优解。Camayd-Muñoz 等<sup>[145]</sup>利用逆向设计的方法设计了一种二氧化钛 (TiO<sub>2</sub>) 和二氧化硅 (SiO<sub>2</sub>) 混合的散射天线结构, 如图 6(c) 所示, 利用 3  $\mu\text{m}$   $\times$  3  $\mu\text{m}$  大小的天线将入射光中的 R、G、B 分量分别导引到下方的三个像素, 获得了超过 70% 的光学效率, 所设计结构的光通量相对于传统的染料滤波器提高了 2 倍以上, 并且保持了极高的色彩纯度。虽然这种天线结构的性能极为优异, 但可以看到其三维结构复杂, 难以加工。实际上, 2011 年日本松下公司就提出过这种三维散射体结构<sup>[146]</sup>, 并通过计算得到了 60% 以上的光学效率, 但这种技术方案还是停留在设计层面, 并在后期被图 6(b) 所示的单个纳米天线所取代。把天线结构限定到一层, 并考虑实际加工过程中的精度问题, Sell 等<sup>[147]</sup>利用逆向设计方法开发了一种高效的多



波长定向路由的纳米天线结构。如图 6(d)所示,首先将纳米天线层定义为平面内硅材料和空气的混合周期结构,按需求设定多个波长在空间的定向传输方向,每次迭代改变纳米天线层每个结构周期中每一个位置点的折射率。使其向硅或者空气的折射率靠近,并使产生的光传输效果逼近设定的目标,最终获得了不规则但性能优异的分光天线设计。利用电子束光刻成功制备出适用于近红外波段的天线器件,该器件展示了低串扰的 5 波长定向路由,平均光

学效率达到 60%左右,相对于滤波器机制提高了 3 倍。这种天线设计有望在高密度图像传感器中得到应用。

综上所述,介质纳米天线分光技术体现了良好的纳米尺度下的空间色散分光,甚至在图像传感器中已经得到了初步的集成验证,可提高光学效率、改善成像功能,不过其能否广泛被产业界所采用,还需要进一步克服偏振和角度的灵敏性问题,开发出合适的低成本制造工艺,同时抑制相邻像素的串扰。

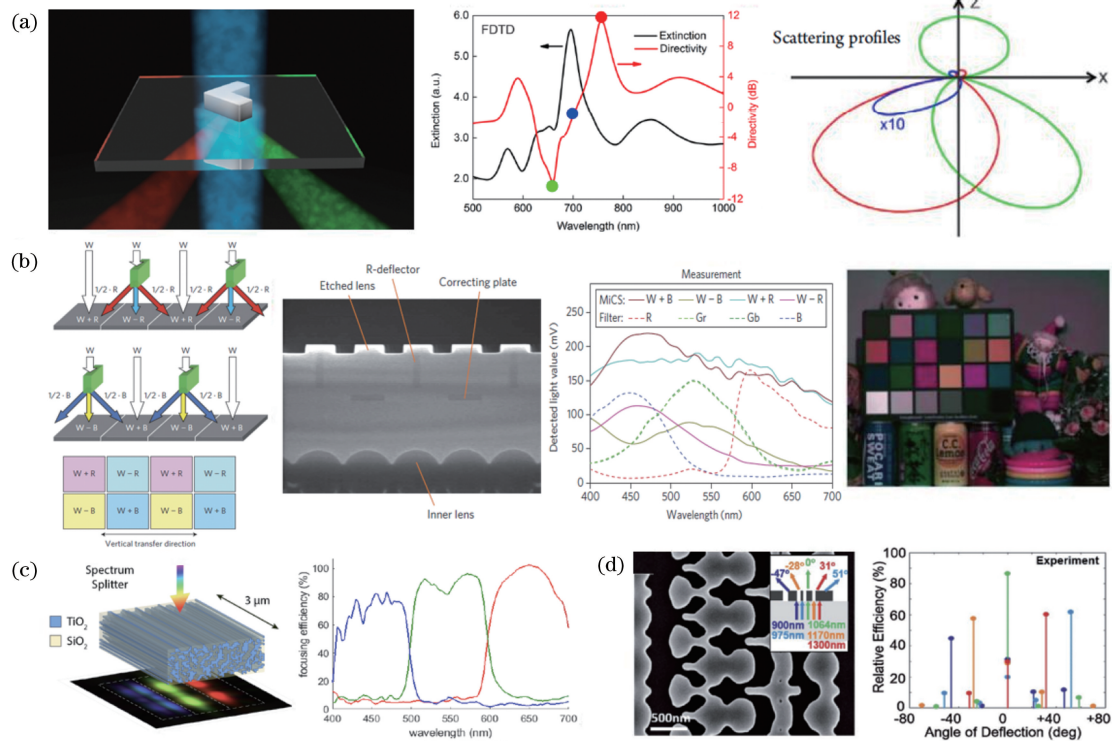


图 6 典型介质纳米天线彩色分光技术。(a)单介质纳米天线<sup>[139]</sup>;(b)介质纳米天线集成的图像传感器<sup>[45]</sup>;(c)逆向设计获得的 RGB 三波段彩色分光纳米结构<sup>[145]</sup>;(d)逆向设计获得的多波长彩色分光纳米结构<sup>[147]</sup>

Fig. 6 Typical dielectric nanoantenna color rendering techniques. (a) Single dielectric nanoantenna<sup>[139]</sup>; (b) image sensor with integrated dielectric nanoantennas<sup>[45]</sup>; (c) color rendering nanostructures for RGB bands obtained by inverse design<sup>[145]</sup>; (d) color rendering nanostructures for multiple wavelengths obtained by inverse design<sup>[147]</sup>

## 4 结束语

通过对现有结构色技术的现状和发展历程的综述分析,发现利用波长相关的空间路由获得彩色分光的技术与彩色滤波技术相比具有高光通量的优势,对于持续发展的高像素密度的图像传感器具有潜在的应用价值,而且亚微米尺度下的多波长空间路由问题研究对于微纳光学方向发展新型光场调控技术也具有重要的学术意义。从目前已报道的研究结果来看,相比于宏观的衍射光栅,金属纳米结构和介质纳米结构基于模式耦合和突变相位等物理机

制,都能够实现小型化的空间彩色分光,具有在图像传感器上实现像素级集成的潜力,理论上能够获得 2~4 倍的光通量。这个问题不仅引起了广大学术界研究者的关注,更是吸引了图像传感器行业各大厂商的研发热情,在二者共同的推动下,亚微米的空分光技术和基于纳米光学结构彩色分光技术的新型图像传感器得以实现,成像效果也验证了空分光技术可提升光通量进而提高成像质量的结论。不过相关技术目前还处于概念阶段,存在以下关键科学技术问题有待解决。

1) 减小相邻像素的光学串扰。共振结构具有

波长选择性,能够在一定程度上抑制光学串扰,而非共振结构由于其光学特性的连续性,通常不具有波长选择性。不管是哪一类结构,目前都难以实现类似染料滤波器的三原色波段间的低串扰性能。已报道的纳米光学元件集成的图像传感器都严重依赖后期的算法来修正彩色分光方面的低色彩纯度。

2) 发展像素级集成的空间分光技术。超构透镜具有聚焦特性,可在一定程度上缓解邻近像素的串扰问题,然而现有报道的超构透镜都具有  $10\ \mu\text{m}$  以上的横向尺寸,没法满足亚微米尺度像素的图像传感器的技术需求。表面等离子激元和纳米天线技术中需要进一步压缩横向尺寸,并优化亚微米区域的三原色分光能力。

3) 降低纳米分光结构的角度敏感性和偏振敏感性。大多数空间分光的研究工作仅分析了正入射和单一偏振的情况,而对于实际成像应用,纳米分光结构需要满足一定视场角和偏振无关的技术需求。光的传输、干涉、衍射等效应基本都与入射角有关,导致目前已报道的结果实际上都具有严重的角度依赖关系,空间色彩分布在  $5^\circ\sim 10^\circ$  入射角变化范围内呈现出了明显差异。

4) 发展高效的设计算法与软件。亚波长尺度下光的传输特性对结构变化较为敏感,一方面提供了很高的设计度,另一方面也增加了结构优化的工作量。目前时域有限差分法或者有限元法等电磁场仿真软件的计算效率非常低,而空间彩色分光结构极为复杂,利用基因算法等来优化结构设计的工作量非常大,急需类似逆向设计等更加有效的设计算法和工具。

5) 发展高深宽比纳米光学结构的可靠制备技术。金属纳米结构通过模式耦合可以在百纳米以下厚度情况下获得空间光路由,但金属吸收损耗导致光通量增益表现较差。介质纳米结构具有良好的光操控能力和低损耗特点,但目前绝大多数的介质空间分光结构都具有较大的深宽比,这对于制备技术提出了巨大挑战。

总之,高像素密度的图像传感器的持续发展面临着严重的亚波长尺度的光传输控制问题,而微纳光学正是光场调控方面的前沿方向,相信基于学术界和产业界的共同努力,微纳光学技术集成的新型图像传感技术与芯片有望实现,以拓展人类的视觉感知能力。

### 参 考 文 献

- [1] Li J J, Du Y G, Zhang L H, et al. Research progress on CMOS image sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(4): 45-52.
- 李继军, 杜云刚, 张丽华, 等. CMOS 图像传感器的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(4): 45-52.
- [2] Ray F. The state-of-the-art of mainstream CMOS image sensors [C]//*Proceedings of the International Image Sensors Workshop*, [S. l.]: [s. n.], 2015: 6-12.
- [3] Johnson W R, Wilson D W, Fink W, et al. Snapshot hyperspectral imaging in ophthalmology [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2007, 12(1): 014036.
- [4] Cui X Q, Ren J, Tearney G J, et al. Wavefront image sensor chip [J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 16685-16701.
- [5] Tokuda T, Yamada H, Sasagawa K, et al. Polarization-analyzing CMOS image sensor with monolithically embedded polarizer for microchemistry systems [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2009, 3(5): 259-266.
- [6] Fu Q Y, Lin Q Y, Zhang W C, et al. A high-speed CMOS image sensor for real-time vision chip [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0828001.
- 付秋瑜, 林清宇, 张万成, 等. 面向实时视觉芯片的高速 CMOS 图像传感器 [J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0828001.
- [7] Piazza L, Lummén T T A, Quiñonez E, et al. Simultaneous observation of the quantization and the interference pattern of a plasmonic near-field [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 6407.
- [8] Lule 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.
- [9] Catrysse P B, Wandell B A. Roadmap for CMOS image sensors: Moore meets Planck and Sommerfeld [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5678: 592483.
- [10] Ahn J, Moon C R, Kim B, et al. Advanced image sensor technology for pixel scaling down toward  $1.0\ \mu\text{m}$  (Invited) [C]//2008 IEEE International Electron Devices Meeting, December 15-17, 2008, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008: 10500521.
- [11] Wu S G, Wang C C, Hsieh B C, et al. A leading-edge  $0.9\ \mu\text{m}$  pixel CMOS image sensor technology with backside illumination: future challenges for pixel scaling [C]//2010 International Electron Devices Meeting, December 6-8, 2010, San

- Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2010: 11777266.
- [12] Rhodes H, Agranov G, Hong C, et al. CMOS imager technology shrinks and image performance [C]//2004 IEEE Workshop on Microelectronics and Electron Devices, April 16-16, 2004, Boise, ID, USA. New York: IEEE Press, 2004: 7-18.
- [13] Findlater K M, Renshaw D, Hurwitz J E D, et al. A CMOS image sensor with a double-junction active pixel[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2003, 50(1): 32-42.
- [14] Mitra P, Robinson J E, Dell J M, et al. Spectrally tunable infrared image sensor having multi-band stacked detectors: US7759644[P]. 2010-07-20.
- [15] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. Nature Photonics, 2010, 4(2): 83-91.
- [16] Koenderink A F, Alù A, Polman A. Nanophotonics: shrinking light-based technology [J]. Science, 2015, 348(6234): 516-521.
- [17] Yao K, Unni R, Zheng Y B. Intelligent nanophotonics: merging photonics and artificial intelligence at the nanoscale [J]. Nanophotonics, 2019, 8(3): 339-366.
- [18] Zhang Q M, Yu H, Barbiero M, et al. Artificial neural networks enabled by nanophotonics [J]. Light: Science & Applications, 2019, 8(1): 319-332.
- [19] Krasnok A, Alu A. Active nanophotonics [J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(5): 628-654.
- [20] Chen X, Huang L L, Mühlenbernd H, et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light [J]. Nature Communications, 2012, 3(1): 1198.
- [21] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. Science, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [22] Lin R J, Su V C, Wang S, et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging[J]. Nature Nanotechnology, 2019, 14(3): 227-231.
- [23] Zhao F, Chen X N, Wang D C. Metalens design and simulation for simultaneous focusing of orthogonal circularly polarized light [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1024001.  
赵峰, 陈向宁, 王得成. 正交圆偏振光同时聚焦的超透镜设计与仿真[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1024001.
- [24] Smith D R. Metamaterials and negative refractive index[J]. Science, 2004, 305(5685): 788-792.
- [25] Soukoulis C M, Linden S, Wegener M. Negative refractive index at optical wavelengths[J]. Science, 2007, 315(5808): 47-49.
- [26] Zhang X, Liu Z W. Superlenses to overcome the diffraction limit[J]. Nature Materials, 2008, 7(6): 435-441.
- [27] Zijlstra P, Chon J W M, Gu M. Five-dimensional optical recording mediated by surface plasmons in gold nanorods[J]. Nature, 2009, 459(7245): 410-413.
- [28] Gu M, Zhang Q M, Lamon S. Nanomaterials for optical data storage[J]. Nature Reviews Materials, 2016, 1(12): 16070.
- [29] Dai Q F, Ouyang M, Yuan W G, et al. Encoding random hot spots of a volume gold nanorod assembly for ultralow energy memory[J]. Advanced Materials, 2017, 29(35): 1701918.
- [30] Lee H S, Yoon Y T, Lee S S, et al. Color filter based on a subwavelength patterned metal grating [J]. Optics Express, 2007, 15(23): 15457-15463.
- [31] 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.
- [32] Kumar K, Duan H, Hegde R S, et al. Printing colour at the optical diffraction limit [J]. Nature Nanotechnology, 2012, 7(9): 557-561.
- [33] Wen L, Chen Q, Hu X, et al. Multifunctional silicon optoelectronics integrated with plasmonic scattering color [J]. ACS Nano, 2016, 10(12): 11076-11086.
- [34] Berzins J, Fasold S, Pertsch T, et al. Submicrometer nanostructure-based RGB filters for CMOS image sensors[J]. ACS Photonics, 2019, 6(4): 1018-1025.
- [35] Verslegers L, Catrysse P B, Yu Z F, et al. Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film[J]. Nano Letters, 2009, 9(1): 235-238.
- [36] Verslegers L, Catrysse P B, Yu Z, et al. Planar metallic nanoscale slit lenses for angle compensation [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(7): 071112.
- [37] Chen Q, Cumming D R S. Visible light focusing demonstrated by plasmonic lenses based on nanoslits in an aluminum film [J]. Optics Express, 2010, 18(14): 14788-14793.
- [38] Ishi T, Fujikata J, Makita K, et al. Si nanophotodiode with a surface plasmon antenna [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44(12): L364-L366.
- [39] Tang L, Latif S, Miller D A B. Plasmonic device in silicon CMOS [J]. Electronics Letters, 2009, 45



- (13): 706-708.
- [40] Zheng B Y, Wang Y M, Nordlander P, et al. Color-selective and CMOS-compatible photodetection based on aluminum plasmonics [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(36): 6318-6323.
- [41] Catrysse P B, Verslegers L, Fesenmaier C C, et al. *Nanophotonics for solid-state imaging* [C]//*Imaging Systems*, Tucson, Arizona. Washington, D. C.: OSA, June 7-8, 2010, Stanford: Stanford University, 2010: ITuA3.
- [42] Cho E H, Kim H S, Cheong B H, et al. Two-dimensional photonic crystal color filter development [J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8621-8629.
- [43] Frey L, Parrein P, Raby J, et al. Color filters including infrared cut-off integrated on CMOS image sensor [J]. *Optics Express*, 2011, 19(14): 13073-13080.
- [44] Yokogawa S, Burgos S P, Atwater H A. Plasmonic color filters for CMOS image sensor applications [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(8): 4349-4354.
- [45] Nishiwaki S, Nakamura T, Hiramoto M, et al. Efficient colour splitters for high-pixel-density image sensors [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(3): 240-246.
- [46] Chen Q, Hu X, Wen L, et al. Nanophotonic image sensors [J]. *Small*, 2016, 12(36): 4922-4935.
- [47] Xu T, Shi H F, Wu Y K, et al. Structural colors: from plasmonic to carbon nanostructures [J]. *Small*, 2011, 7(22): 3128-3136.
- [48] Yu Y, Wen L, Song S C, et al. Transmissive/Reflective structural color filters: theory and applications [J]. *Journal of Nanomaterials*, 2014, 2014(2014): 212637.
- [49] Kristensen A, Yang J K W, Bozhevolnyi S I, et al. Plasmonic colour generation [J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 2(1): 16088.
- [50] Ji C G, Lee K T, Xu T, et al. Engineering light at the nanoscale: structural color filters and broadband perfect absorbers [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(20): 1700368.
- [51] Wang J X, Fan Q B, Zhang H, et al. Research progress in plasmonic structural colors [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(1): 23-33.  
王嘉星, 范庆斌, 张辉, 等. 表面等离子体结构色研究进展 [J]. *光电工程*, 2017, 44(1): 23-33.
- [52] El Gamal A, Eltoukhy H. CMOS image sensors [J]. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 2005, 21(3): 6-20.
- [53] Theuwissen A J P. CMOS image sensors: state-of-the-art [J]. *Solid-State Electronics*, 2008, 52(9): 1401-1406.
- [54] Ramanath R, Snyder W E, Bilbro G L, et al. Demosaicking methods for Bayer color arrays [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2002, 11(3): 306-316.
- [55] Adams J, Parulski K, Spaulding K. Color processing in digital cameras [J]. *IEEE Micro*, 1998, 18(6): 20-30.
- [56] Fontaine R. Part 2: pixel scaling and scaling enablers [EB/OL]. (2019-07-16) [2020-06-29]. <https://www.techinsights.com/blog/part-2-pixel-scaling-and-scaling-enablers>.
- [57] Taguchi H, Enokido M. Technology of color filter materials for image sensor [C]//2011 International Image Sensor Workshop, [S. l.]: [s. n.], 2011: 34-37.
- [58] Gather M, Köhnen A, Falcou A, et al. Solution-processed full-color polymer organic light-emitting diode displays fabricated by direct photolithography [J]. *Advanced Functional Materials*, 2007, 17(2): 191-200.
- [59] Catrysse P, Wandell B, El Gamal A. An integrated color pixel in 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS technology [C]//*International Electron Devices Meeting. Technical Digest (Cat. No. 01CH37224)*, December 2-5, 2001, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 2001: 24.4.1-24.4.4.
- [60] Catrysse P B, Wandell B A. Integrated color pixels in 0.18- $\mu\text{m}$  complementary metal oxide semiconductor technology [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2003, 20(12): 2293-2306.
- [61] Yang W H, Xiao S M, Song Q H, et al. All-dielectric metasurface for high-performance structural color [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 1864.
- [62] Yoon Y T, Lee S S. Transmission type color filter incorporating a silver film based etalon [J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 5344-5349.
- [63] Li Z Y, Butun S, Aydin K. Large-area, lithography-free super absorbers and color filters at visible frequencies using ultrathin metallic films [J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(2): 183-188.
- [64] Chen Y, Duan X, Matuschek M, et al. Dynamic color displays using stepwise cavity resonators [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(9): 5555-5560.
- [65] Sakat E, Vincent G, Ghenuche P, et al. Guided mode resonance in subwavelength metallodielectric free-standing grating for bandpass filtering [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3054-3056.
- [66] Niraula M, Yoon J W, Magnusson R. Single-layer optical bandpass filter technology [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 5062-5065.

- [67] Quaranta G, Basset G, Martin O J F, et al. Recent advances in resonant waveguide gratings [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12 (9): 1800017.
- [68] Gétin S, Désières Y, Marie M, et al. Nanoplasmonic filters for image sensors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7249: 724904.
- [69] Shrestha V R, Lee S S, Kim E S, et al. Aluminum plasmonics based highly transmissive polarization-independent subtractive color filters exploiting a nanopatch array[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(11): 6672-6678.
- [70] Heydari E, Sperling J R, Neale S L, et al. Plasmonic color filters as dual-state nanoparticles for high-density microimage encoding [J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(35): 1701866.
- [71] Miyamichi A, Ono A, Kamehama H, et al. Multi-band plasmonic color filters for visible-to-near-infrared image sensors[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25178-25187.
- [72] Mehta A, Rumpf R C, Roth Z, et al. Nanofabrication of a space-variant optical transmission filter [J]. *Optics Letters*, 2006, 31 (19): 2903-2905.
- [73] Williams C, Gordon G S D, Wilkinson T D, et al. Single-step fabrication of multispectral filter arrays using grayscale lithography and metal-insulator-metal geometry [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, California, May 13-18, 2018, Washington, D.C.: OSA, 2018: STh1I.2.
- [74] Walls K, Chen Q, Grant J, et al. Narrowband multispectral filter set for visible band [J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 21917-21923.
- [75] Song S C, Sun F H, Chen Q, et al. Narrowlinewidth and high-transmission terahertz bandpass filtering by metallic gratings[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, 5(1): 131-136.
- [76] Chen Q, Chitnis D, Walls K, et al. CMOS photodetectors integrated with plasmonic color filters [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(3): 197-199.
- [77] Przybilla F, Degiron A, Genet C, et al. Efficiency and finite size effects in enhanced transmission through subwavelength apertures [J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9571-9579.
- [78] Yu Y, Chen Q, Wen L, et al. Spatial optical crosstalk in CMOS image sensors integrated with plasmonic color filters[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 21994-22003.
- [79] Dammann H. Color separation gratings[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(15): 2273-2279.
- [80] Palmer E W, Hutley M C, Franks A, et al. Diffraction gratings (manufacture) [J]. *Reports on Progress in Physics*, 1975, 38(8): 975-1048.
- [81] Farn M W, Stern M B, Veldkamp W B, et al. Color separation by use of binary optics [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(15): 1214-1216.
- [82] Farn M W, Knowlden R E, Stern M B, et al. Color separation gratings [C]//NASA Conference Publication. Washington, DC: NASA, 1993: 409-421.
- [83] Layet B, Cormack I G, Taghizadeh M R. Stripe color separation with diffractive optics [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(35): 7193-7201.
- [84] Miyata M, Nakajima M, Hashimoto T. High-sensitivity color imaging using pixel-scale color splitters based on dielectric metasurfaces [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(6): 1442-1450.
- [85] Zhang D G, Wang P, Jiao X J, et al. Progress in surface plasmon subwavelength optics [J]. *Physics*, 2005, 34(7): 508-512.  
张斗国, 王沛, 焦小瑾, 等. 表面等离子体亚波长光学前沿进展 [J]. *物理*, 2005, 34(7): 508-512.
- [86] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [87] Wang Z L. A review on research progress in surface plasmons [J]. *Progress in Physics*, 2009, 29(3): 287-324.  
王振林. 表面等离激元研究新进展 [J]. *物理学进展*, 2009, 29(3): 287-324.
- [88] Keshavarz Hedayati M, Elbahri M. Review of metasurface plasmonic structural color [J]. *Plasmonics*, 2017, 12(5): 1463-1479.
- [89] Faraday M. The Bakerian lecture: experimental relations of gold (and other metals) to light [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1857, 147: 145-181.
- [90] Mie G. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen [J]. *Annalen Der Physik*, 1908, 330(3): 377-445.
- [91] Ozaki M, Kato J I, Kawata S. Surface-plasmon holography with white-light illumination [J]. *Science*, 2011, 332(6026): 218-220.
- [92] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, et al. Extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays [J]. *Nature*, 1998, 391 (6668): 667-669.
- [93] Yoon Y T, Lee S S, Lee B S. Visible filter integrated with an image sensor fabricated by a 90-nm standard CMOS process [C]//2010 23rd Annual

- Meeting of the IEEE Photonics Society, November 7-11, 2010, Denver, CO, USA. New York: IEEE Press, 2010: 630-631.
- [94] Chen Q, Das D, Chitnis D, et al. A CMOS image sensor integrated with plasmonic colour filters [J]. *Plasmonics*, 2012, 7(4): 695-699.
- [95] Drezet A, Koller D, Hohenau A, et al. Plasmonic crystal demultiplexer and multiports [J]. *Nano Letters*, 2007, 7(6): 1697-1700.
- [96] Lezec H J, Degiron A, Devaux E, et al. Beaming light from a subwavelength aperture [J]. *Science*, 2002, 297(5582): 820-822.
- [97] Aouani H, Mahboub O, Devaux E, et al. Plasmonic antennas for directional sorting of fluorescence emission [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(6): 2400-2406.
- [98] Laux E, Genet C, Skauli T, et al. Plasmonic photon sorters for spectral and polarimetric imaging [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(3): 161-164.
- [99] Kosako T, Kadoya Y, Hofmann H F. Directional control of light by a nano-optical Yagi-Uda antenna [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(5): 312-315.
- [100] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [101] Shegai T, Chen S, Miljković V D, et al. A bimetallic nanoantenna for directional colour routing [J]. *Nature Communications*, 2011, 2(1): 481.
- [102] Shegai T, Johansson P, Langhammer C, et al. Directional scattering and hydrogen sensing by bimetallic Pd-Au nanoantennas [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(5): 2464-2469.
- [103] Shibanuma T, Matsui T, Roschuk T, et al. Experimental demonstration of tunable directional scattering of visible light from all-dielectric asymmetric dimers [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(3): 489-494.
- [104] Artar A, Yanik A A, Altug H. Directional double Fano resonances in plasmonic hetero-oligomers [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(9): 3694-3700.
- [105] Guo R, Decker M, Setzpfandt F, et al. Plasmonic Fano nanoantennas for on-chip separation of wavelength-encoded optical signals [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(5): 3324-3328.
- [106] Barelli M, Mazzanti A, Giordano M C, et al. Color routing via cross-polarized detuned plasmonic nanoantennas in large-area metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2020, 20(6): 4121-4128.
- [107] Vercruyse D, Sonnefraud Y, Verellen N, et al. Unidirectional side scattering of light by a single element nanoantenna [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(8): 3843-3849.
- [108] Zhuo X, Yip H K, Cui X, et al. Colour routing with single silver nanorods [J]. *Light: Science & Applications*, 8(1): 39.
- [109] Shakoor A, Cheah B C, Hao D, et al. Plasmonic sensor monolithically integrated with a CMOS photodiode [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(10): 1926-1933.
- [110] Shah Y D, Shah Y D, Connolly P W R, et al. Ultralow-light-level color image reconstruction using high-efficiency plasmonic metasurface mosaic filters [J]. *Optica*, 2020, 7(6): 632-639.
- [111] Ni X J, Wong Z J, Mrejen M, et al. An ultrathin invisibility skin cloak for visible light [J]. *Science*, 2015, 349(6254): 1310-1314.
- [112] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
- [113] Yan C, Yang K Y, Martin O J F. Fano-resonance-assisted metasurface for color routing [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(7): e17017.
- [114] Meng Y, Hu F, Liu Z, et al. Chip-integrated metasurface for versatile and multi-wavelength control of light couplings with independent phase and arbitrary polarization [J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): 16425-16439.
- [115] Pedrotti F L, Pedrotti L M, Pedrotti L S. *Introduction to optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [116] Fan Z B, Shao Z K, Xie M Y, et al. Silicon nitride metalenses for close-to-one numerical aperture and wide-angle visible imaging [J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(1): 014005.
- [117] Chen Q. Effect of the number of zones in a one-dimensional plasmonic zone plate lens: simulation and experiment [J]. *Plasmonics*, 2011, 6(1): 75-82.
- [118] Fu Y H, Kuznetsov A I, Miroshnichenko A E, et al. Directional visible light scattering by silicon nanoparticles [J]. *Nature Communications*, 4(1): 1527.
- [119] Pfeiffer C, Grbic A. Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(19): 197401.
- [120] Miao Z Q, Wu Q, Li X, et al. Widely tunable terahertz phase modulation with gate-controlled graphene metasurfaces [J]. *Physical Review X*, 2015, 5(4): 041027.
- [121] Berry M V. The adiabatic phase and Pancharatnam's



- phase for polarized light [J]. *Journal of Modern Optics*, 1987, 34(11): 1401-1407.
- [122] Lin D M, Fan P Y, Hasman E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements [J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298-302.
- [123] Aieta F, Kats M A, Genevet P, et al. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation [J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1342-1345.
- [124] Khorasaninejad M, Shi Z, Zhu A Y, et al. Achromatic metalens over 60 nm bandwidth in the visible and metalens with reverse chromatic dispersion [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(3): 1819-1824.
- [125] Wang S, Wu P C, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices [J]. *Nature Communications*, 8(1): 187.
- [126] Faraji-Dana M, Arbabi E, Arbabi A, et al. Compact folded metasurface spectrometer [J]. *Nature Communications*, 9(1): 4196.
- [127] Wang B, Dong F L, Li Q T, et al. Visible-frequency dielectric metasurfaces for multiwavelength achromatic and highly dispersive holograms [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(8): 5235-5240.
- [128] Guo L H, Hu Z L, Wan R Q, et al. Design of aluminum nitride metalens for broadband ultraviolet incidence routing [J]. *Nanophotonics*, 2018, 8(1): 171-180.
- [129] Lin D, Holsteen A L, Maguid E, et al. Photonic multitasking interleaved Si nanoantenna phased array [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(12): 7671-7676.
- [130] Zang X F, Dong F L, Yue F Y, et al. Polarization encoded color image embedded in a dielectric metasurface [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(21): 1707499.
- [131] Chen B H, Wu P C, Su V C, et al. GaN metalens for pixel-level full-color routing at visible light [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(10): 6345-6352.
- [132] Zhou Y, Kravchenko I I, Wang H, et al. Multilayer noninteracting dielectric metasurfaces for multiwavelength metaoptics [J]. *Nano Letters*, 2018, 18(12): 7529-7537.
- [133] Pile D. Graphene versus metal plasmons [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 420.
- [134] Boltasseva A, Atwater H A. Low-loss plasmonic metamaterials [J]. *Science*, 2011, 331(6015): 290-291.
- [135] Huang C J, Chen C, Wang S W. An introduction to performance of optical nano-antennas [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060005.
- 黄彩进, 陈成, 王顺文. 纳米光学天线性能研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060005.
- [136] Jahani S, Jacob Z. All-dielectric metamaterials [J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, 11(1): 23-36.
- [137] Schuller J, Brongersma M. General properties of dielectric optical antennas [J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 24084-24095.
- [138] Palanchoke U, Boutami S, Gidon S. Spectral sorting of visible light using dielectric gratings [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33389-33399.
- [139] Li J Q, Verellen N, Vercruyssen D, et al. All-dielectric antenna wavelength router with bidirectional scattering of visible light [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(7): 4396-4403.
- [140] Yun S, Nam S, Roh S, et al. Image sensor including color separation element and image pickup apparatus including the image sensor: US9860492 [P]. 2018-01-02.
- [141] Sohn J. Color splitter, method of manufacturing the same, and image sensor including the same: US9766467 [P]. 2017-09-19.
- [142] Piggott A Y, Lu J, Lagoudakis K G, et al. Inverse design and demonstration of a compact and broadband on-chip wavelength demultiplexer [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(6): 374-377.
- [143] Molesky S, Lin Z, Piggott A Y, et al. Inverse design in nanophotonics [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(11): 659-670.
- [144] Zhao H J. Reverse design of resonance-domain rectangular-groove dielectric surface-relief gratings [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(4): 879-884.
- 赵华君. 共振域矩形介质光栅的逆向设计 [J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(4): 879-884.
- [145] Camayd-Muñoz P, Roberts G, Debbas M, et al. Inverse-designed spectrum splitters for color imaging [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 5-10, 2019, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2019: AM4K.3.
- [146] Suzuki Y, Ozeki Y, Yoshino T, et al. Proposal of micro-trichroic structures for high-sensitivity color image sensors [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 50(4): 042201.
- [147] Sell D, Yang J J, Doshay S, et al. Periodic dielectric metasurfaces with high-efficiency, multiwavelength functionalities [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(23): 1700645.