



红外与激光工程
Infrared and Laser Engineering
ISSN 1007-2276, CN 12-1261/TN

《红外与激光工程》网络首发论文

题目: 从亚波长光栅到超构光栅: 原理、设计及应用
作者: 陈瑞, 柳夏, 王虹, 石伟怡, 刘伟男, 江绍基, 董建文
收稿日期: 2020-06-02
网络首发日期: 2020-09-22
引用格式: 陈瑞, 柳夏, 王虹, 石伟怡, 刘伟男, 江绍基, 董建文. 从亚波长光栅到超构光栅: 原理、设计及应用[J/OL]. 红外与激光工程.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20200921.1122.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

从亚波长光栅到超构光栅:原理、设计及应用

陈瑞, 柳夏, 王虹, 石伟怡, 刘伟男, 江绍基, 董建文*

(中山大学物理学院, 广东广州 510275)

摘要: 随着纳米光子学的发展, 光学结构如光学微腔、波导结构、光子晶体、亚波长光栅、超构表面等能够在微纳尺度实现对光的传输与调控, 推动了光学集成化的发展。亚波长光栅由于其结构简单、成本低廉等特点得到了科学家们广泛的研究, 应用在各种光学器件, 逐渐形成了光栅分析模型的成熟理论体系。结合周期性结构耦合行为及超构表面中超构原子的散射调制特性, 从亚波长光栅衍生出的超构光栅能够利用周期性布拉格散射提高调控光束的效率, 从而避免了超构表面相位离散化带来的效率降低和能量损失。科学家们研究并设计了超构光栅, 更多的物理现象及应用被探究和挖掘。文中对亚波长光栅以及超构光栅的基本理论、设计及应用进行了概述。从基本原理出发, 论述了亚波长光栅和超构光栅的特性, 综述了二者的理论设计及单元设计方法, 并介绍了在生物传感、滤光片光谱调控和吸收薄膜等方面的应用。最后, 展望了未来的发展方向。

关键词: 亚波长光栅; 超构光栅; 导模共振; 生物传感; 滤光片光谱调控; 吸收薄膜

中图分类号: O439

文献标志码: A

DOI: 10.3788/IRLA20201039

From subwavelength grating to metagrating: principle, design and applications

Chen Rui, Liu Xia, Wang Hong, Shi Wei-yi, Liu Weinan, Jiang Shaoji, Dong Jianwen*

(School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: With the development of nanophotonics, optical structures, such as optical microcavity, waveguide structure, photonic crystal, subwavelength gratings and metasurfaces, can realize light transmission and manipulation at nanoscale, which promotes the development of optical integration. Subwavelength grating has been widely studied by scientists because of its simple structure and low cost. It has gradually formed a mature theoretical system of grating analysis model when applied to various optical devices. Combined with the coupling of periodic structure and scattering modulation characteristics of meta-atoms, the metagrating derived from subwavelength gratings can improve the efficiency by using periodic Bragg scattering, thus avoiding the efficiency reduction and energy loss caused by the phase discretization. Scientists have studied and designed metagratings, and more physical phenomena and applications have been explored. In this paper, the basic theory, design and application of subwavelength gratings and metagratings were summarized. Based on the basic principle, the characteristics of subwavelength gratings and metagratings were discussed, the theoretical and unit

收稿日期:2020-06-02; 修订日期:2020-08-24

基金项目:国家重点研发计划(2019YFB2203502); 国家自然科学基金(61775243, 11761161002)

作者简介:陈瑞(1984-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事成像光学、计算光学、微纳超构表面等方面的研究。

Email: chenr229@mail.sysu.edu.cn

通讯作者:董建文(1981-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事拓扑光子学、微纳超构表面, 新型光学探测成像技术等方面的研究。

Email: dongjwen@mail.sysu.edu.cn

design methods were also outlined and their applications in biosensing, spectral control of filter and absorption film were introduced. Finally, the future development was prospected.

Key words: subwavelength grating; metagrating; guide-mode resonance; biosensing; spectral control of optical filter; absorption film

0 引言

一直以来,光束调控都是一个基础且重要的研究课题,在传感、滤波、光热等日常生活和科学研究的多个方面都有重要的应用。从起初基于传统几何光学元件如棱镜、透镜等实现光束方向改变或聚焦,到基于光学衍射元件如菲涅尔透镜、衍射透镜等实现光束的波前调制^[1],在这其中,周期性结构光栅发挥着重要作用,利用衍射光栅的多级次衍射现象,如图 1(a)所示,尤其是随后延伸而来的闪耀光栅、达曼光栅、中阶梯光栅等系列的出现,带来了许多高效及新颖的光束调控光学器件,并应用于光谱仪、滤波器、光热吸收器等不同光学器件上。但是,传统的几何及衍射光学元件对光束的操控都依赖于材料的折射率及传输过程的相位积累实现,一方面,这导致光学元件不利于扩展到集成应用和微纳应用;另一方面,只能实现电磁波的相位和振幅在自由空间的调控,限制了其应用潜能和范围。

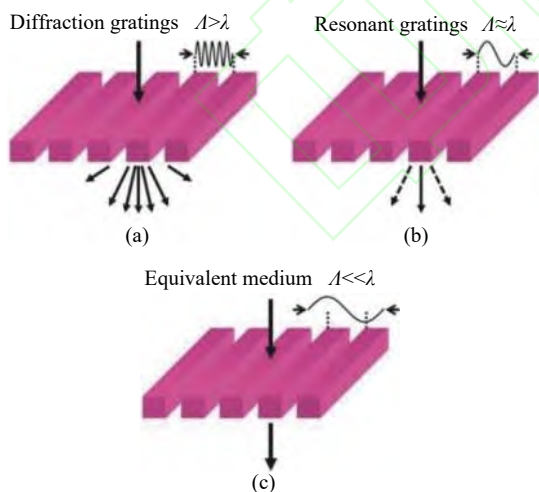


图 1 不同尺度下的介质光栅。(a) 衍射光栅;(b) 共振(亚波长)光栅;(c) 等效介质薄膜

Fig.1 Dielectric grating at different scales. (a) Diffraction gratings; (b) Resonant (subwavelength) gratings; (c) Equivalent dielectric films

随着微纳光子学的发展及其制备技术的进步,微纳尺度的光学结构如光学微腔、波导结构、光子晶

体、超构表面等能够在微纳尺度实现对光的传输与调制,推动了光子学集成化的发展^[1-2]。为了满足应用需求而随之发展的严格分析理论和设计机理促进了光束调控效率和性能等指标的提高。在其中,称周期常数小于工作波长的周期性光栅为亚波长光栅(见图 1(b)和图 1(c))。随着共振现象的发现与严格电磁波理论方法的发展,科学家们广泛地研究了亚波长光栅的独特特性,并将亚波长光栅应用于各种光学器件的设计中,逐渐形成了光栅分析模型的成熟理论体系^[3]。但是,该体系的进一步发展需要新思想、新材料和新方法。

近 20 年来,由亚波长人工设计原子(meta-atoms)构建的超构材料(metamaterials)的发现带来了与自然材料所不具有的现象和功能,如负折射^[4]、隐身^[5]等等。进一步,将超构原子在二维上排列所组成的超构表面(metasurfaces),则因其超薄的平面结构和丰富的光束调控特性而备受关注。通过对金属微纳天线或介质颗粒及柱形结构的散射特性研究与结构设计,可以对传输电磁波在振幅、相位、偏振甚至频率等各个自由度进行任意调制,并将这种微纳结构应用到各种光学元件中^[6]。但是,需要注意到,超构表面对光束的调控是通过相位的离散化以及相位梯度实现,因而存在阻抗不匹配的问题,限制了光学元件效率等各项性能的提高。

近年来,结合亚波长光栅的周期性耦合行为和超构原子散射调制特性,科学家发展了另外一种类似于传统光栅的特殊超构表面,即超构光栅(metagratings)^[7]。超构光栅在结构上具有亚波长光栅的周期性,但与传统光栅不同的是其界面上具有覆盖 2π 的突变相位,可以对各个衍射级次进行调制。科学家们正是利用了光栅周期性结构的布拉格散射提高了调控光束的效率,从而避免了超构表面相位离散化带来的效率降低和能量损失^[7],使得亚波长光栅这一具有一定历史的研究对象重新焕发了新的生命力,在已趋近成熟的理论体系上注入了新内涵。科学家们研究了超构光栅对光束的调控,发现了新现象和揭示了新物理,推动了亚波长光栅在信息、生命和材料等领域

的交叉应用。

文中对亚波长光栅以及其衍生超构光栅的研究进展进行了综述。从亚波长光栅和超构光栅的基本原理出发,论述了二者独有的特性,综述了亚波长光栅和超构光栅的理论设计及单元设计方法,主要介绍了亚波长光栅在生物传感、滤光片光谱调控和吸收薄膜等方面的应用,相对而言,近几年出现的超构光栅主要集中在理论研究阶段,作为光束调控的未来发展方向,预期会受到更加广泛的研究。

1 亚波长光栅和超构光栅及其基本特性

自 1821 年 Fraunhofer 提出衍射光栅理论,在近两个世纪的时间里光栅逐渐成为最基本的光学元件之一,针对不同的应用要求,已经发展出多种不同结构和性能的衍射光栅^[1,8-9],即光栅周期大于工作波长的光栅(见图 1(a))。此时可以利用经典的衍射理论来描述光与光栅的相互作用。随着光电子集成技术的发展,科学家们从大尺寸光栅开始关注更小尺寸的亚波长光栅,即光栅周期比入射光波长要小的光栅,如图 1(b)和 1(c)所示。

当光栅周期与工作波长相当(图 1(b)),光栅通常只有零级或只存在零级与一级衍射光,而更高的衍射级次以倏逝波的形式存在。在这一尺度下,光与光栅的相互作用表现为共振响应,因此也常被称为共振光栅,该尺度下光栅具有丰富的特性如导模共振^[10]、相干多重散射等。诸多科学家在这一尺度下利用光栅独特特性实现了不同的应用,如窄带滤波^[11-12]、高反现象^[13]、滤光片滤波和光耦合^[14]等。当光栅周期远远小于工作波长(见图 1(c)),这时,光栅只有一个衍射

级出射,其光学性质可用等效介质理论来分析,即将光栅结构当做一层各向异性薄膜处理^[15-16]。

近年来出现的超构表面可以对光束波前进行任意调控,但是仍旧具有一定的局限性,尤其是大角度入射时,由于其相位离散化带来的局限,效率将会降低,大角度所需要的相位梯度使得超构原子的间隔较小,因而对于制备工艺要求较高。科学家们将光栅的周期性结构重新引入,对超构原子进行周期性排布,对超构原子的散射进行设计,衍生出超构光栅^[7],如图 2 所示。至此,超构光栅被众多科学家关注,其工作波段由微波波段相应扩展到红外、可见光(见图 3)及声学等其他系统^[17-27]。

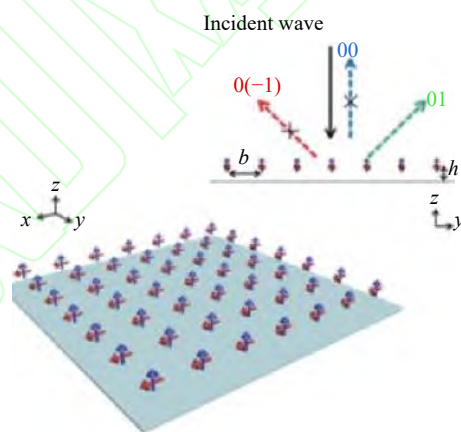


图 2 超构光栅的提出^[7]

Fig.2 Proposal of metagratings^[7]

相比于传统衍射光栅,亚波长光栅具有尺寸小的特点;相比于其它微纳结构,亚波长光栅结构简单、成本低廉。亚波长光栅这些优良特点使其被广泛地研究与开发应用,同时,进一步将光栅周期性引入到超

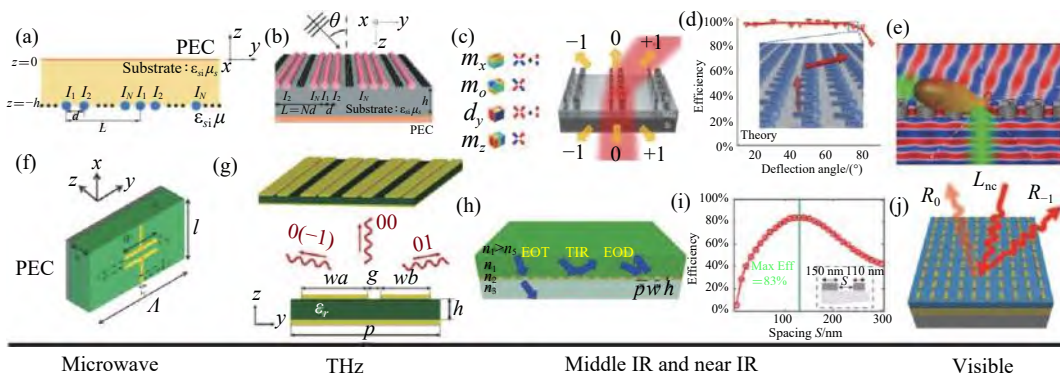


图 3 不同波段的亚波长光栅和超构光栅^[17-27]

Fig.3 Subwavelength gratings and metagratings at different wavelengths^[17-27]

构表面结构中^[7],对超构原子进行周期性排布,衍生出超构光栅。这两种光栅拥有传统光栅所不具有的特性,为高效、高集成度光束调控提供了更多的可能,输出的光谱线形主要取决于受其几何结构与介质材料调制的电磁模式的共振与耦合来实现多种特性,比如滤波、衍射调控、电磁场增强效应等。

滤波在通信、探测和传感等领域中一直是提高信噪比和扩充信道容量的主要手段。然而,以薄膜为代表的传统滤波器通常由数百层四分之一波片堆叠构成,不仅体积质量大,且随着对滤波光谱要求的提高其设计和制备也愈发困难。相比之下,紧凑的亚波长光栅结构不仅可以利用多种较为成熟的工艺加工和制备,而且能设计各种滤波形式,包括角度、频率等单个自由度滤波,具有频率、角度二维选择性的超构滤波器和极窄带、全角超构滤波器以及级联超构光栅实现的窄带窄角透射滤波器(见图4)^[28]等,以上这些对微纳光子学来说意义非常重大。

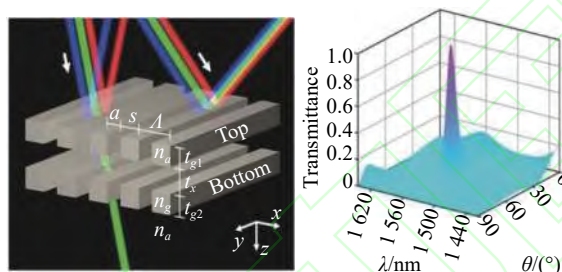


图 4 级联超构光栅实现的窄带窄角透射滤波器结构及其透射谱^[28]

Fig.4 Narrow-frequency sharp-angular transmission filter structures and the spectrum using cascaded metagratings^[28]

超构光栅具有超构表面的各种异常光学特性,通过特定的超构原子调控实现异常的衍射行为,不仅具有高效率大角度的特点,而且还具有新奇的物理机制,比如奇偶性相关的异常折射/反射现象^[26]。2017年,科学家研究了各向异性的超构原子,提出可以理论上实现效率为 1 的衍射调控^[7]。通过磁性颗粒阵列,可以对光束的衍射进行操控,使得其它衍射级的光均被抑制,只留下-1 级次,入射角度为 10°,出射的角度为 -77°,如图 2 所示。至此大量的科学家从理论上研究了不同超构光栅的调控衍射行为,为将来的应用打下坚实的基础。

亚波长光栅及超构光栅的共振响应可以增强局

域电磁场,一方面,可以实现荧光发射增强,这为生物分子荧光标记提供了便利。另一方面,以亚波长光栅及超构光栅作为吸收薄膜实现的电磁场局域增强,可以在宽光谱实现吸收性能增强。此种特性不仅能够满足在生物传感方面的应用,还能够实现吸收薄膜满足在太阳能光热方面的应用,具体的单元设计和应用将在第二和第三节做具体的论述。

2 理论设计

早期的 Fraunhofer 的标量衍射理论,不仅可以分析衍射光栅的衍射级传播方向,而且还可以解决各级衍射光的光栅效率分别为多少的问题^[1]。具体而言,标量衍射理论将周期性的狭缝看作次辐射源,利用 Fraunhofer 近似,离散衍射级由每个子源发射的波的相干位置给出。而衍射强度则是由单个狭缝的强度函数和干涉函数的乘积得到,因此原本的函数受到单缝强度函数的调制而会出现尖锐的峰。由强度分布即可得知效率分布情况,干涉函数取决于光栅周期,而单缝强度函数则取决于狭缝的几何形状。这就是衍射效率分布的经典理论。然而,这种标量理论并不能解释所有的光栅衍射现象。其中就包括 1902 年发现的 wood 异常,光栅光谱呈现了两种“异常”的光谱跳变^[29]。这两种异常现象在最终被 Lord Rayleigh 和 Fano 解释后,实验学家和理论学家对这些光栅“异常”进行了广泛的研究,推动了对周期性结构的共振现象的研究。

自从 20 世纪 60 年代以来,众多科学家基于麦克斯韦波动方程提出了“严格的”电磁理论模型,在没有任何理论近似的情况下,获得麦克斯韦方程组和边界条件的数值解。其中积分法是 1966 年由多位作者提出的第一个严格光栅理论,并成功用于计算覆盖有银、铝和金膜的全息光栅的实验曲线^[30]。随后多种严格理论逐渐被认可:经典微分法,虚拟源法,有限元法,格林函数法,严格耦合波理论等。相比近似理论方法,严格理论方法不仅能够对不同的电磁结构分析,而且能够精确地反映光栅光谱分布等性能。

2.1 亚波长光栅分析理论

随着越来越多的科学家研究亚波长光栅,逐渐形成了几种代表性的亚波长光栅分析理论,如图 5 所示,其共通点为分析其中的共振现象,通过模式的展

开与耦合,来揭示其对光谱分布的影响。其中一种最有代表性的理论是由 Pierce 在 1954 年提出的耦合模理论 (Couple-mode theory, CMT), 如图 5(a) 所示^[31], 通过考虑具有相互耦合的传播模式的线性系统, 从能量守恒和互易性中导出基本性质。后来, 扩展到时域的耦合模理论 TCMT 是分析共振纳米结构阵列和设计多个输入和输出平面波耦合的有效光子器件的有力工具^[32]。

另一种分析光栅的经典理论是一导模共振 (Guided-Mode Resonance), 如图 5(b) 所示。其核心思想是将光栅底层为平板波导, 其中存在一系列的导模。入射光束与光栅进行作用时, 当衍射级波矢与导模的波矢匹配时, 将会在横向传输, 形成导模共振, 在该过程中, 模式也会不断往外辐射, 耦合到外面的模

式将对直接透射或反射光谱产生影响, 并在其传输过程中, 每经过一次界面耦合出来的光束, 相互也会进行干涉, 干涉的结果导致了窄带的高反射或透射率的位置出现与存在^[33]。因此, 通常会用导模共振来设计光栅滤波器。

当光栅的占空比较小, 即单元结构之间的距离较大时, 集体共振的分析变得不便利。此时, 将光栅单元当作一个一个独立的单元, 研究其散射特性。其中, Mie 散射提供了一种很好的模式展开的依据。将模式展开成电偶极子、磁偶极子、四极子以及更高的阶数。近年来, 这种方法对超构原子的分析尤为重要。Kerker 效应为电偶极子与磁偶极子相互耦合的理论。而广义的 Kerker 效应的提出更是给了很好的补充, 多极子间相互耦合与干涉的过程决定了相应的散射行为, 如图 5(c) 所示^[35]。

对于一些结构规则的亚波长光栅, 还可以采用另外一种展开方式, 即波导阵列模式展开^[36-39]。如图 6 所示的一层介质光栅的三层模型。在各个区域, 电磁场将表示为多个衍射级的平面波之和。对于区域 II, 可以将光栅结构看作周期排列的波导阵列, 用多个波导阵列模式的线性叠加来表示区域 II 的电磁场。这种波导阵列不仅考虑了单根矩形条波导, 而且也考虑了相邻波导之间的耦合。通过上下界面边界条件, 可以得到出射到光栅各级次的反射与透射率, 即衍射效率。最终可以获得各个 (包括透射和反射) 衍射级次的效率。

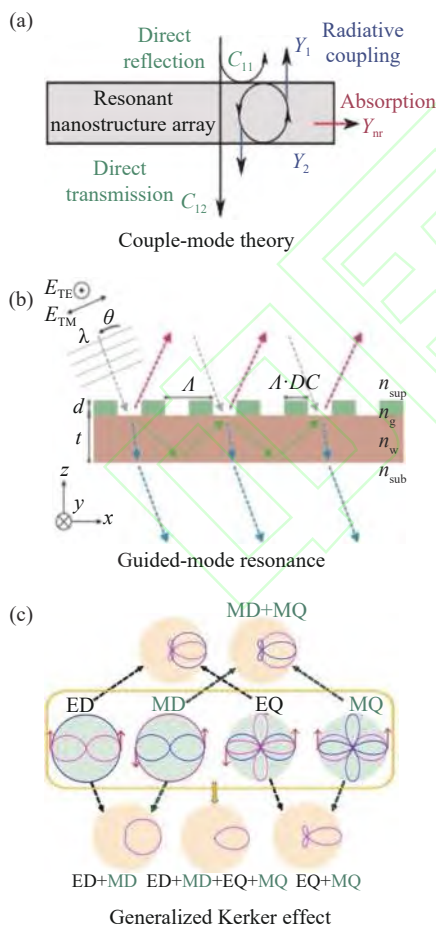


图 5 光栅分析理论: 模式展开、共振与干涉。(a) 耦合模理论^[31]; (b) 导模共振理论^[33-34]; (c) 广义 Kerker 效应^[35]

Fig.5 Analytical theory of optical gratings: mode expansion, resonant and interference. (a) Coupled-mode theory^[31]; (b) Guided-mode resonance theory^[33-34]; (c) Generalized Kerker effect^[35]

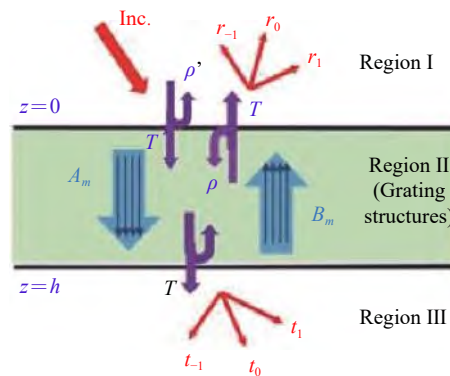


图 6 波导阵列模式展开^[36-39]

Fig.6 Waveguide array mode expansion^[36-39]

2.2 超构光栅的单元设计

亚波长光栅的理论设计同样也适用于超构光栅

的分析。另外,超构光栅的最大特点是可以通过特定的超构原子的光学特性,实现异常衍射行为的调制,且具有高效率大角度等特点^[7,26]。因此,超构光栅的单元设计对于超构光栅性能的提升具有重要的作用。主要有以下几种常见方式及代表工作。

(1) 电路型超构光栅单元

在 Alu 研究组提出超构光栅的概念后^[7], Rabino- vich, Epstein 以及 Burokur 等研究组分别报道了在微波波段实现超构光栅的完美衍射的理论及实验工作^[40-44]。图 7(a) 展示了超构光栅实现衍射级调控的工作,通过一系列的阻抗相关的理论分析,实现了工作频率下 95% 以上的效率^[45],也考虑了不同入射角对于超构光栅对衍射级的调控影响^[46]。

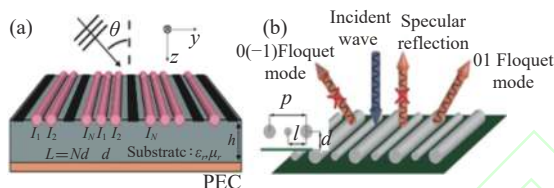


图 7 电路型超构光栅衍射调控^[45-46]

Fig.7 Electrical circuits type of metagrating diffraction modulation^[45-46]

(2) 非对称介质结构单元

在介质中,也可以对超构光栅的衍射级进行调控。在正入射的情况下,通常采用的是非对称或各向异性的单元设计,调节它们的散射特性,并结合光栅的衍射,实现高效率特定衍射级次出射。2017 年, Ng 研究组提出一种非对称的纳米天线阵列实现光束的大角度的偏折,如图 8 所示,通过结合周期性光栅的衍射行为与预先设计好的结构单元的散射特性,令结构单元的散射方向与光栅的-1 级次的出射方向相一致,从而抑制其他散射或衍射的方向,实现高效率的偏折。有科学家通过特定的设计,使得绝大部分的光集中到+1 级方向实现了 85°的大角度偏折,实现正入射与斜入射时的某一特定透射级次的高效率偏折特性^[47-48]。

(3) 拓扑优化设计超构光栅单元

为了更有针对性地设计超构光栅单元,科学家们提出通过优化设计超构光栅单元。最具代表性的就是通过拓扑优化方法设计超构单元。Fan 研究组在 2017 提出以拓扑优化设计的超构光栅,可以实现大角

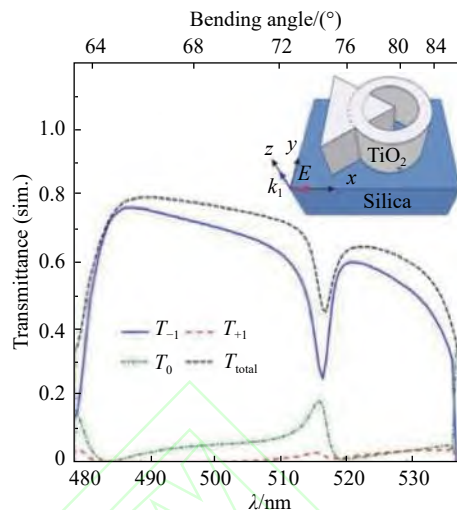


图 8 各项异性或非对称超构光栅光束偏折

Fig.8 Beam-steering using anisotropic or asymmetric metagrating

度(75°)且高效率的光束偏折,如图 9 所示,理论和实验证明其设计的超构光栅效率在 TE 和 TM 光束均能实现大于 80% 的衍射效率。后来科学家利用拓扑优化方法实现了高效偏折及分束器的设计,以及斜入射负角度偏折的设计^[48-49]。总之,该方法能够针对目标设计超构光栅单元,是众多科学家研究的方向和超构光栅单元设计的发展方向。

(4) 其它超构光栅结构单元设计

Deng 等人提出一种金属狭缝结构,实现了对反射级次的操控,对入射光束,抑制其 0 级的反射,而使大部分的光通过 R-1 级的衍射端口出射^[7],并进一步研究了不同的金属超构光栅,实现衍射操控的设计,并应用在全息实现中,如图 10(a) 所示。当入射光斜入射到结构时,光栅实现偏折则不一定需要非对称的结构,而可以用更简单的结构实现。Liu 在 2017 年的工作中提出一种对超构晶格的严格分析方法,在晶格常数与工作波长相近时,可称作超构光栅^[49]。通过对多级子展开与分析,再加上晶格耦合的作用,很好地解释了超构光栅的衍射分布以及高效率的偏折行为。同样也可以利用矩形介质超构光栅实现对光束的大角度高效率的调控,2020 年, Shi 等人利用简单矩形结构,实现了这一现象并用波导阵列模式展开进行了相应的解释,如图 10(b) 所示^[50]。展示了 T-1 级衍射效率随波长与入射角度变化的情况,其中最高可以达到的效率为 97.55%。

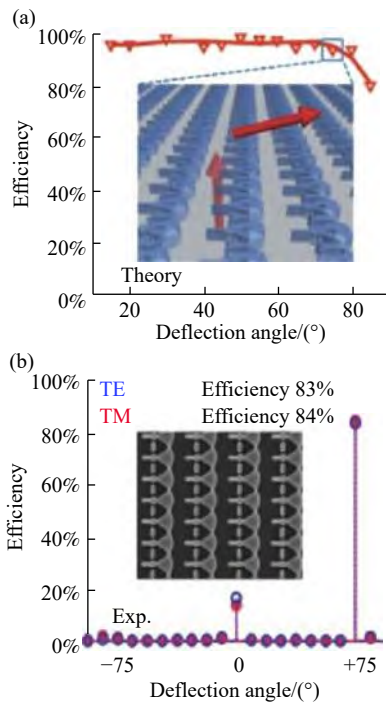
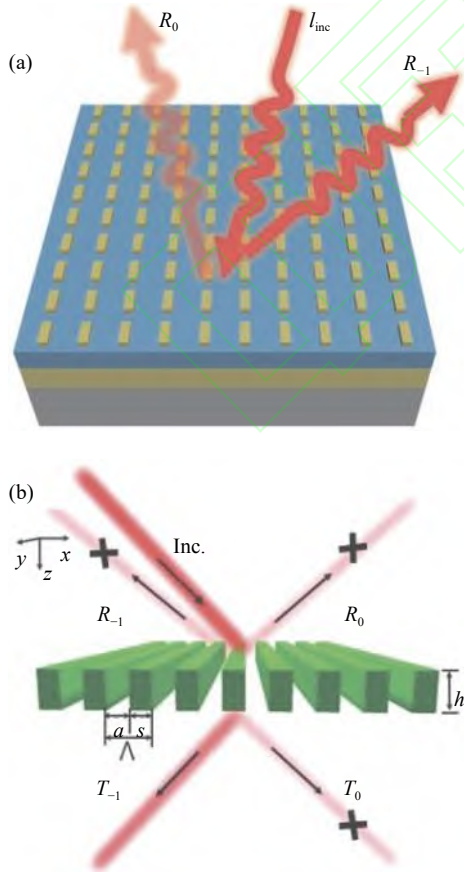


图9 拓扑优化结构单元的超构光栅

Fig.9 Metagrating based on topology optimization

图10 矩形介质光栅实现高效率光束偏折^[50]Fig.10 High efficient beam-steering using rectangle dielectric grating^[55,50]

3 亚波长光栅及超构光栅应用

在前两节,对于亚波长光栅以及超构光栅的基本特性和理论设计给出了详细概述。正是这些基本特性赋予了它们广泛的应用。亚波长光栅在传感、滤光片光谱调控和太阳能光伏光热吸收薄膜等领域具有重要应用。目前,相对于亚波长光栅而言,作为亚波长光栅衍生的超构光栅应用研究较少,更多的是上节中超构光栅单元设计以及如何控制衍射级输出的物理机制研究和分析^[51-52]。下面的应用将主要介绍亚波长光栅应用。随着超构光栅理论和设计发展,将能有效改善传感、滤光片光谱调控、吸收薄膜等领域的应用性能。

3.1 传感应用

亚波长光栅的传感应用来源于它的两个主要性质:窄带滤波和场增强效应。前者可通过结合光谱或者光强分析来探测光栅表面黏附生物微粒之后的折射率变化,进而指示出微粒的浓度;后者则通常结合荧光标记法,利用光栅的场增强效应提升荧光激发的强度,使荧光探测的灵敏度得到提高。该节主要介绍了基于峰值波长、峰值强度和荧光增益三个方面的生物传感应用。

(1) 峰值波长传感

1983年, Lukosz 等首次在共振波导光栅结构中实现了对空气中相对湿度的传感特性^[53]。之后,光栅导模共振理论的提出使得亚波长光栅的窄带滤波特性逐渐应用于生物传感^[12]。1998年,罗切斯特大学的研究者 Norton 等人通过在石英衬底上制备 Si_3N_4 亚波长光栅,证实了光栅的窄带反射峰的角度(或波长)会随着光栅所处的液体折射率的变化而移动的现象^[54-55]。在2000年, Wawro 等人发表了在光纤端面制备亚波长光栅以实现窄带滤波的工作,实验上获得了约18%的反射峰,但与普通衬底上的窄带反射变化相比还存在较大的差距^[56]。2001年,基于峰值波长移动的生物传感器件逐渐成熟,马萨诸塞州的 Cunningham 等利用受体分子与光栅表面的结合,可以分辨出0.1 nm的蛋白质结合厚度变化^[57-58],进一步在塑料薄膜上利用亚微米复刻工艺大面积地生产光栅传感器^[59],后来又整合到了384孔的标准微孔板中组成无标记传感系统 BIND^[60]。Corning 公司紧随其

后发展了 Epic™ 生物传感系统^[61],并着重报道了其在测量蛋白质底物消化特征方面的应用^[62]。最新的进展包括采用解析算法预测共振波导光栅的确切共振波长^[64]、利用悬空的 GaN 薄膜光栅^[65]和高折射率对比度光栅 (High-Contrast Grating)^[66]结构以及通过测定导模共振峰值波长处的相位移动来实施传感^[67]。

(2) 荧光增益传感

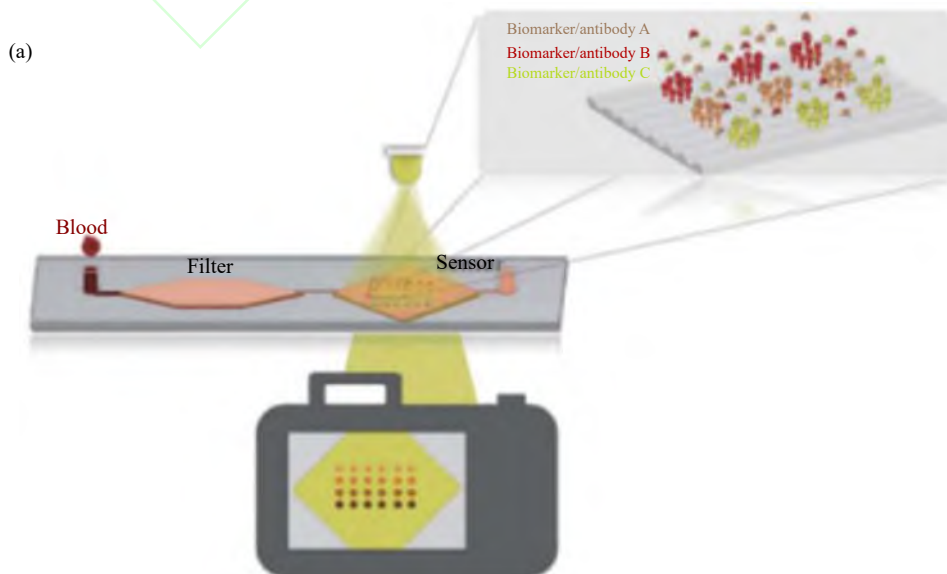
亚波长光栅的共振响应可增强局域电磁场,这为生物分子荧光标记提供了便利。2007 年 Ganesh 等人首次利用二维光子晶体平板 (可视作亚波长光栅) 实现了胶体量子点的荧光发射增强^[68]。Ganesh 等随后还研究了二维亚波长光栅荧光增强的近场性质,发现与金属表面上的表面等离子激元原理相反,当荧光团最接近光子晶体表面时,并不存在短距离的淬灭,反而可以获得最大的增强^[69]。对比单光子,双光子荧光增益由于其低散射和静态光漂白发生率低、细胞和组织在近红外波段具有更好的耐受性以及自发荧光少的优势,被许多研究者关注。传统激发双光子荧光的办法需要高强度的聚焦激光光束,这使得光损伤阈值大为降低。利用共振效应实现的方法主要包括表面等离子激元共振增益法,但该机制使用成本较高且有时需要合成特殊的染料^[70-71]。2004 年 Soria 等在未使用高聚焦激光激发的情况下,研究了共振波导光栅表面光谱,发现采用光栅后可将双光子激发的探测能力提升 10 倍以上^[72]。将皮秒脉冲激光与双光栅波导结构结合,同样可以增强荧光染料和荧光标记生物分子中的

双光子荧光激发^[73-74]。Thayil 等在 2008 年使用共振光栅波导结构提高荧光标记的鲍登酮 (Boldenone) 和一种特定的抗合成代谢抗体之间的相互作用的检测,使检测灵敏度达到表面覆盖率约 0.7 ng/mm² 的水平^[75]。

(3) 峰值强度传感

基于共振响应的生物传感办法往往需要借助于光谱分析,例如峰值波长传感就需要根据共振波长的移动来探测生物分子。这在一定程度上增加了器件的集成难度与成本,不利于即时检测。2010 年 Nazirizadeh 等提出了基于峰值强度的传感方法,使用两个交叉偏振滤光片进行透射测量增大传感信噪比,仅需要低成本的发光二极管和光电二极管,就可以使检测蛋白链霉亲和素的浓度降至 2.5 nM^[76]。随后,该研究组还展示了具有 96 通道的峰值强度读取传感器^[77]。

Jahns 等人在 2015 年开发了一套基于相机与亚波长光栅结合的手持生物传感读取系统,如图 11 所示^[78]。通过这种成像方法,可以同时读取直径为 2 cm 的整个光栅传感器的表面。融合了光学和微流控技术的基于光流体的峰值强度生物传感技术在成本控制方面也具有一定优势^[79]。采用注塑和溅射工艺制备的导模共振光栅 (亚波长光栅) 芯片制造成本不到一美元,结合普通的 LED 和光电二极管,可实现在 0.04 RIU 的宽线性检测范围内 4.10×10^{-5} RIU 的折射率分辨率^[80]。



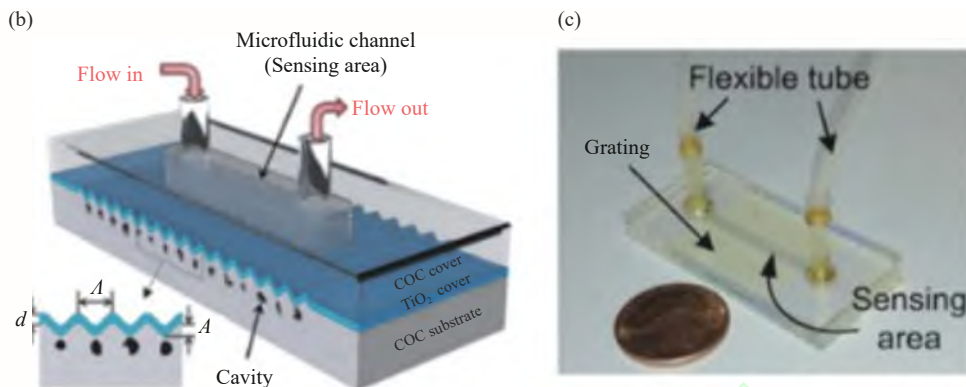


图 11 (a) 具有纳米级结构和逐点测量传感功能的微流控芯片示意图^[78]; 一次性导模共振生物传感器芯片的 (b) 示意图和 (c) 其光学图像, 包括在环烯烃共聚物 (COC) 基板上的亚波长光栅 (一维 TiO_2 光栅) 结构和用于处理注射液的微流体模块^[80]

Fig.11 (a) Schematic of microfluidic chip with nanostructured and spot-wise functionalized sensor field^[78]; (b) Schematic and (c) optical image of the disposable GMR biosensor chip, consisting of a subwavelength grating (a one-dimensional TiO_2 grating structure) on a cyclic olefin copolymer substrate and a microfluidic module for handling the injection of fluid sample into the sensing area^[80]

3.2 滤光片光谱调控应用

对于传统有机染料滤光片, 随着尺寸的减小, 其滤光性能会下降, 与有机滤光片相比, 光栅滤光片工作在亚波长尺度, 具有滤波特性, 并且其在集成简单、可调谐性、颜色稳定性和超出衍射极限的高分辨率方面具有优势。随着制备技术的发展, 亚波长光栅滤光片发展出多样的结构, 各自具有独特的特点和功能, 如纳米孔阵列滤光片、一维纳米光栅滤光片和纳米天线阵列滤光片等。与亚波长光栅的应用相比, 超构光栅在滤光片光谱调控方面的应用较少。

(1) 基于纳米孔阵列的滤光片

金属薄膜中的纳米孔阵列在光的照射下, 能够产生光学共振, 其光谱会产生一些特殊的现象。超透射理论说明了具有纳米孔阵列的金属薄膜可以选择性地透射指定波长范围的光^[81-83]。通过调节纳米孔阵列的几何特性, 比如周期、直径和形状等^[84-86], 可以调节超透射所形成的光谱特性。基于纳米孔阵列的亚波长光栅结构简单, 易于制造, 所以基于纳米孔阵列的彩色滤光片适合应用于商业产品。

2012 年, Sozo 等人在铝膜中制备了六角晶格排列的纳米孔阵列, 制备出了红黄蓝三原色等离子体滤光片, 如图 12(a) 所示^[87]。同年, 基于纳米孔阵列的等离子体色滤波片集成在 CMOS 图像传感器上, 如图 12(b) 所示^[88]。2013 年 Burgos 等人设计了纳米孔阵列滤光片, 尺寸仅为 $6\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$ 的滤光片的滤光效率能够达

到无限阵列的 90% 并将其集成到 CMOS 图像传感器上, 演示了全彩色高分辨率成像, 并具有良好的颜色保真度, 其结构如图 12(c) 所示^[89]。

对于金属基纳米孔阵列, 最大缺点是其透光率低 ($<60\%$)。研究人员尝试寻找其它材料实现来解决效率低的问题。2017 年, Horie 等人提出了一种基于多晶硅薄膜的亚波长光栅 (纳米孔阵列) 滤光片, 如图 12(d) 所示, 该装置的透光率达到 $60\% \sim 80\%$, 几乎不受偏振影响^[90]。同年, Fouladi 等也设计了一种对偏振不敏感的双模工作滤波器, 采用纳米孔铝膜阵列与改良的介质环境相接触, 使得光学效率高达 $70\% \sim 80\%$, 提高了透射模式的颜色选择性^[91]。除了圆形纳米孔阵列, 一些研究小组也对其它几何形状的纳米孔阵列进行了研究, 比如不对称的 C 形孔径时^[92]和十字形交叉纳米孔阵列^[93-94]等。

(2) 基于一维纳米光栅的滤光片

1978 年, Knop 研究了一维金属结构在彩色滤波应用中的衍射光栅效应, 开辟了纳米亚波长光栅滤光片领域^[95]。由于周期小于入射光波长, 纳米光栅不产生更高的衍射级数, 光栅可视为均匀层, 由入射光与周期结构的耦合产生的导模共振效应可以实现选择性的光谱响应^[96]。当平面波导上的纳米光栅周期满足导模共振的条件 $\max\{\sqrt{\epsilon_1}, \sqrt{\epsilon_3}\} \leq |\sqrt{\epsilon_1} \sin\theta - i\lambda/\Lambda| < \sqrt{\epsilon_g}$, 其中 ϵ_1 、 ϵ_3 和 ϵ_g 分别是入射介质、衬底和纳米光栅的介电常数, θ 是入射角, i 是衍射级次, λ 是波长, Λ 是纳

米光栅的周期, 光栅在谐振波长处作为可实现带通滤波的效果。

也可以直接在衬底上制备金属纳米光栅, 设计特定几何参数实现不同的颜色响应^[97-99]。2013 年 Zeng

等人利用纳米结构金属膜的超低透射现象提出了一种等离子体减色滤光方案^[98], 传输效率达到了 60%~70%, 其结构和光谱图如图 13(a)~13(b) 所示。2017 年 Wang 等人开发了基于纳米金属光栅的等离子体色滤

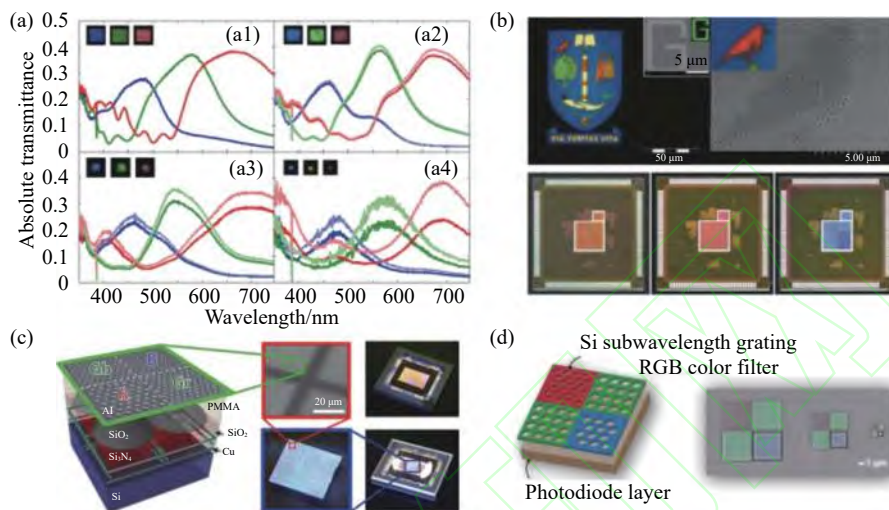


图 12 纳米孔阵列亚波长光栅滤光片。(a) 基于金属铝的纳米孔阵列滤光片, 尺寸边长分别为 (a1)10 μm , (a2)5 μm , (a3)2.4 μm , (a4)1.2 μm 的滤光片光谱^[87]; (b) 纳米孔阵列形成的彩色徽标^[88]; (c) 与 CMOS 图像传感器结合的纳米孔阵列滤光片^[89]; (d) 基于硅材料亚波长光栅滤光片^[90]

Fig.12 Nanohole array subwavelength grating filters. (a) Transmission spectra of the hole array filters with different side length (a1)10 μm , (a2)5 μm , (a3)2.4 μm , (a4)1.2 μm ^[87]; (b) Color logo based on the nanohole array filter^[88]; (c) Nanohole array filter integrated with CMOS imaging sensor^[89]; (d) Si subwavelength grating color filters^[90]

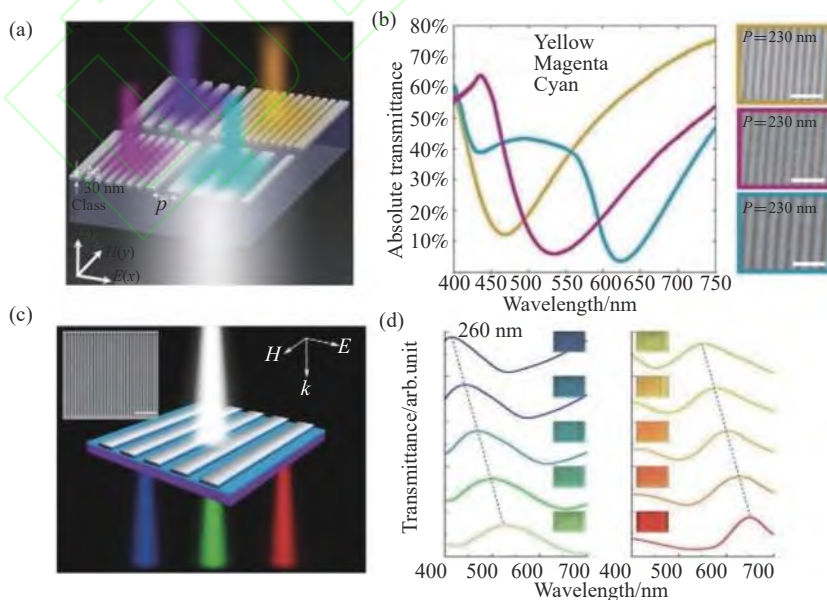


图 13 一维纳米光栅滤光片。超薄银等离激元纳米光栅滤光片 (a) 结构示意图和 (b) 光谱图^[98]; (c) 纳米光栅滤光片结构示意图; (d) 颜色光谱与滤光片光栅周期之间的关系^[100]

Fig.13 One dimensional nanograting color filters. (a) Schematic diagram and (b) the spectra of the ultrathin Ag nanogratings color filters^[98]; (c) Schematic diagram of the nanograting color filters; (d) Relationship between color spectra and period of the color filter nanograting^[100]

光片,在可见光谱中达到 70% 的传输效率,同时厚度可以减小到 <200 nm,其结构和光谱图如图 13(c)~(d) 所示^[100],图 13(d) 中,周期设置为 260~530 nm,步长 30 nm。除此之外,还可以通过在金属纳米光栅上覆盖介质层来实现滤光效果,比如由介质覆盖铝纳米光栅制成的高效动态减色滤光片通过等离子共振和导模共振相结合来实现彩色滤光^[99]。另外也有一些工作是使用介质纳米光栅实现彩色滤光功能^[101-103]。

(3) 基于纳米天线阵列的滤光片

近些年来,研究者对纳米天线阵列的滤光片进行了探究^[104-111]。通过调整纳米天线尺寸、周期性和排列等几何参数,实现对光谱的调节。如果纳米天线具有方向性,则产生的颜色将受入射光的偏振影响^[112-113]。

对于径深比较小的垂直纳米线阵列。其颜色是由单个纳米线的导模共振产生的,能够获得很好的光吸收效果。另外,纳米线的顶部和底部界面形成了法布里珀罗腔,激发了纵向模式产生了特殊的反射和吸收特性^[104]。2011 年 Seo 等人验证了使用垂直硅纳米线产生一系列明亮颜色扩散到整个可见区域的可行

性,纳米线阵列的扫描电子显微镜图像和反射光谱如图 14(a)~(b) 所示^[105]。该滤波器的谐振波长度由纳米线半径决定。纳米线能够独立地确定自己的颜色,并不受其相邻结构的影响。2014 年 Park 等人提出了一种具有集成光电探测器的全硅垂直纳米线彩色滤光片,其结构和光谱图如图 14(c)~(d) 所示,利用滤光片形成的减色光谱可以实现彩色成像^[106]。2017 年 Yoon 等人通过对不对称纳米线结构探索,进一步探讨了垂直纳米线单元结构对光学特性的影响^[107]。

研究人员对于单元结构为纳米盘的阵列也进行了探索,2016 年 Yue 等人首先通过将硅铝(Si-Al) 杂化纳米盘集成到 Si 衬底上,形成高效的青色、洋红和黄色减色滤光片,其结构和光谱图如图 15(a)~(b) 所示^[108]。该彩色滤波器性能优于传统纳米线阵列滤波器,因为在共振波长下的带宽和接近零的反射率都很窄。此外,通过改变混合纳米盘直径,可以在可见光谱上调谐共振,得到纯度高的颜色,可调节色域更广。

基于金属等离子体纳米结构的彩色滤光片的性能往往因金属吸收损耗而恶化。为了减轻金属损耗,

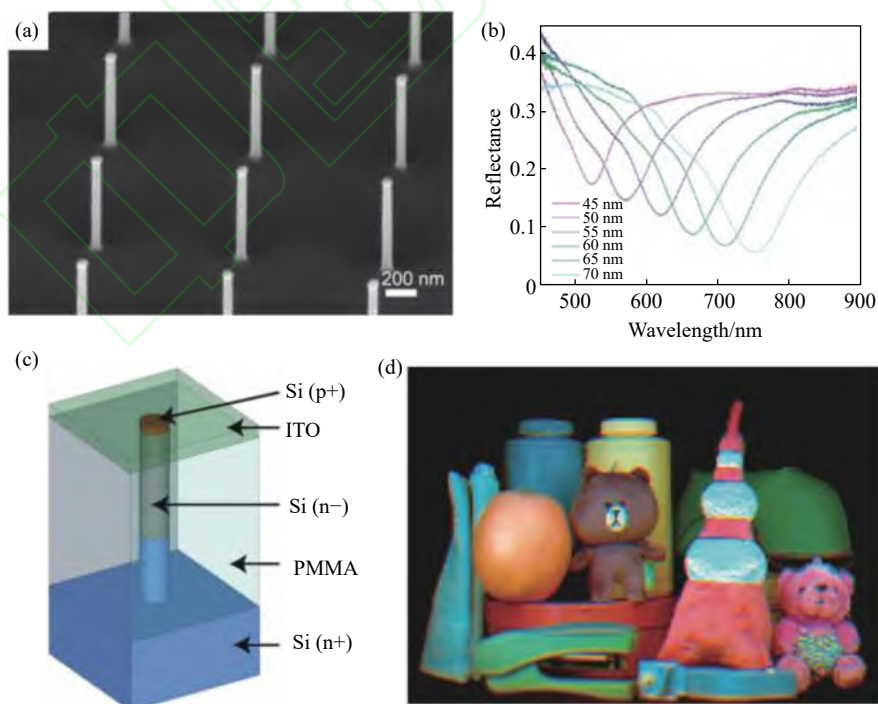


图 14 (a) 硅纳米线阵列扫描电子显微镜图。(b) 不同纳米线阵列的滤光片反射光谱^[105]; (c) 垂直硅纳米线光电探测器的概念示意图; (d) 硅纳米线阵列拍摄测试对象的彩色图像^[106]

Fig.14 (a) SEM images of silicon nanowire array; (b) Reflection spectra of color filter for different nanowire arrays^[105]; (c) Concept schematic of photoelectric detectors based on vertical silicon nanowires; (d) Color image of test objects taken by silicon nanowire arrays^[106]

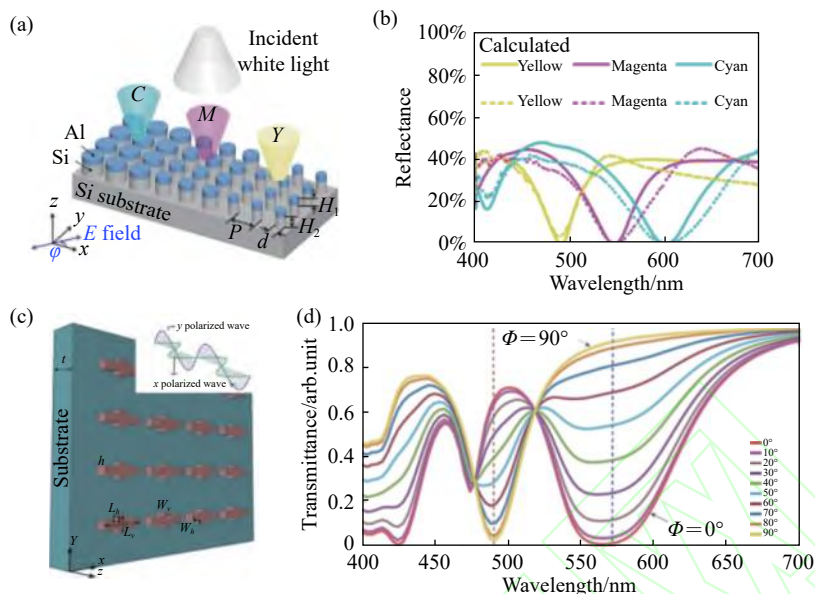


图 15 (a) 硅铝杂化纳米盘滤光片; (b) 硅铝杂化纳米盘减色滤光片的反射光谱^[108]; (c) 十字形硅纳米天线阵列滤光片; (d) 十字形硅纳米天线阵列透射光谱^[113]

Fig.15 (a) Schematic configuration and (b) reflection spectral responses of the subtractive CMY color filters incorporating a Si-Al hybrid-ND metasurface formed on a Si substrate^[108]; (c) Cross-shaped Si nanoantennas color filters and (d) its transmittance spectra^[113]

研究者提出了高折射率介质材料。由于 CMOS 兼容性,硅是构建介质滤光片的最佳选择之一。2017 年 Park 等分析由氢化非晶硅 (a-Si: H) 制成的高性能介电变面彩色滤光片^[109]。接着,2019 年 Park 等人提出了高效结构彩色滤光片,该滤光片由嵌入在聚合物层中的富硅氮化硅纳米柱的二维阵列组成,此种光谱滤波特性可以通过 Mie 散射形成的电偶极子和磁偶极子共振^[110]。

实现纳米天线阵列的偏振选择特性也获得了很多研究者的关注。2017 年 Vashistha 等人基于不对称十字形硅纳米天线 (见图 15(c)) 开发了偏振相关彩色滤光片,通过适当调整非对称交叉的矩形段,其可以产生任意颜色,不同偏振角度对应的透射光谱如图 15(d) 所示^[112]。2018 年 Yang 等人提出了基于氧化钛的偏振相关结构,其单元结构为椭圆柱,实现了不同偏振光获得不同颜色调控效果^[113]。

3.3 吸收薄膜

在众多可再生能源中,太阳能具有资源量巨大、源源不断以及绿色环保等众多突出的优点,对太阳能进行合理有效地开发利用,将促进人与自然的和谐相处,具有可持续发展的重要战略意义。对太阳能的利

用主要体现在光伏光热领域^[114-116]以及辐射制冷两方面^[117]。两者的共同特征是具备高性能的吸收薄膜,吸收薄膜可以将工作波段内的入射电磁波能量高效地转化成欧姆热或者其它形式的能量以待利用,吸收薄膜是充分利用太阳能的关键元件,高性能的吸收薄膜可以将入射电磁波高效吸收,其吸收性能不依赖于入射光的偏振态,同时受入射角度的改变影响较小,即此元件具备宽频宽角高吸收率特征,考虑到商业化应用,制备方法应具备大面积、低成本等特征。亚波长光栅结构由于其独有特性能够为以上性能的实现提供可能性,随着研究的发展,在未来能够实际应用到光伏光热太阳能应用中。

(1) 吸收薄膜的吸收机理

吸收薄膜对太阳能的吸收利用,可以从两方面来解释其吸收机理,一是材料本征吸收,二是各种结构导致的电磁场增强,从而增强吸收性能。大量研究表明,面向太阳能应用场景的吸收薄膜在结构上呈现多样性,以期实现多种类型的共振叠加以达到宽频宽角高吸收率目的,按照其结构,将其分为一维光栅和二维光栅两类介绍其在太阳能方面的应用。

(2) 一维光栅

针对一维光栅结构,科学家开展了众多研究工

作。2012 年, Nicholas 等人设计了金属-电介质交替堆叠而形成的一个锥形吸收器, 如图 16(a) 所示, 此吸收器通过实现慢光波导效应提高了吸收器的吸收效果^[118]。2019 年, 科学家通过在垂直方向上叠加微纳结构实现了宽带吸收, 设计了如图 16(c) 所示的吸收器, 该结构在 570~3 539 nm 波长范围内的平均吸收率达到 97%, 同时具备偏振不敏感性^[119]。进一步, 有研究者通过粒子群优化算法设计了 Au 光栅结构堆叠在电介质层与 Au 上, 实现的吸收器通过在水平方向上叠加不同尺寸的微纳结构而拓宽了吸收谱^[120]。2019 年, Baohua Jia 等人制备了面积为 12.5 cm² 的覆盖了 300~2 500 nm 波段的超薄吸收器, 此吸收器在可见光区域, 光栅将光耦合进多个导波, 可以实现宽光谱及宽角度响应都有利于太阳能的采集^[121]。

(3) 二维光栅

对于二维光栅, 科学家采取了不同的单元结构来实现宽带高效率吸收, 这些结构包括圆盘型^[122-127]、方形^[128-133]、十字型^[134-138]、不规则型^[139-145]等。纳米圆盘形结构的吸收器由于具备结构对称性, 因此入射电磁波的偏振态对其吸收性能影响效果小, 该结构对 TM 模式和 TE 模式的入射电磁波都具有几乎一样的

吸收效果^[122]。纳米圆盘形结构吸收器的吸收机理来自三个方面: 金属材料的本征吸收、二维纳米结构阵列会激发传播型表面等离激元和局域型表面等离激元, 从而激发出电偶极子以及对应波长的磁共振, 最后该 MIM 三层结构存在 FP 腔可以增强电磁场局域在中间的电介质层, 如图 17(a)~17(b)^[123]所示。除此以外, 在水平方向上整合不同半径的二维结构, 如图 17(c) 所示^[124], 可以达到拓宽吸收谱的作用, 类似的, 通过水平叠加也可以达到宽带吸收^[125-126]。同样的, 在垂直方向上叠加不同半径的二维圆盘形结构, 如图 17(d) 所示^[127], 也能有效地扩宽原有结构的吸收频段。

方形结构吸收器的吸收机理与圆盘形结构类似, 方形结构的长与宽是相等的, 对 TM 和 TE 模式的入射电磁波都具有一样的吸收效果, 但由于结构对称性比圆盘形稍差, 因此对入射电磁波偏振态的不敏感性上比圆盘形结构差, 从两者的吸收谱对比也可以看出材料对吸收性能的影响^[128-129]。纳米方形结构同样可以在水平方向和垂直方向上使用不同宽度的方形结构, 同样可扩宽原有结构的吸收频段^[130-131], 如图 17(c) 所示。通过精确调整长方形结构参数可以调整其吸收特性, 在光栅和金属基板上形成反向平行电

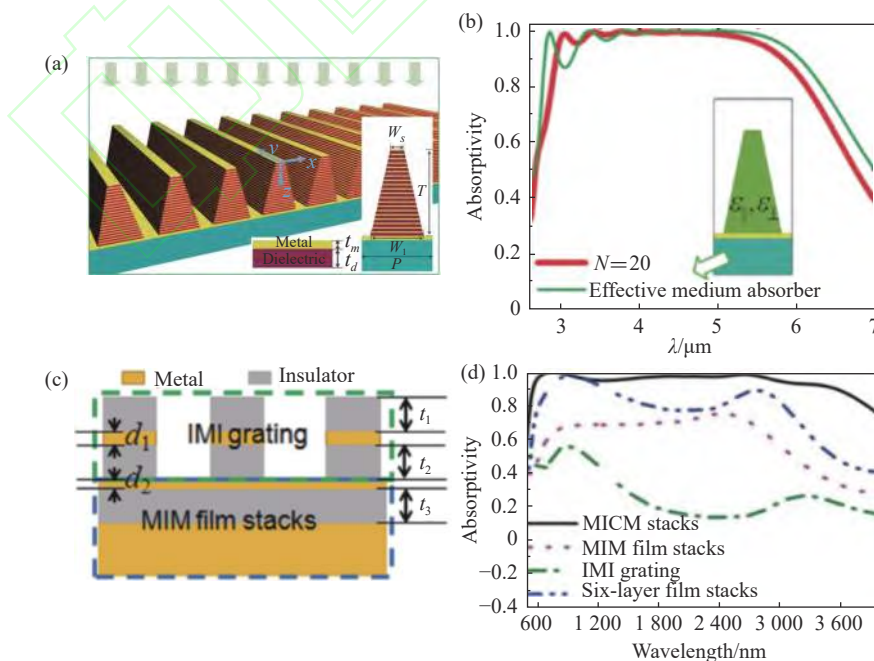


图 16 亚波长光栅(各向异性超材料薄膜)(a) 结构图及 (b) 吸收谱图^[118]; (c) MICM 结构示意图; (d) 不同结构的吸收谱对比图^[119]

Fig.16 (a) Diagram and (b) absorption spectra of the subwavelength grating (sawtooth anisotropic metamaterial thin film)^[118]; (c) Diagram of MICM (metal-insulator composite multilayer); (d) Comparison of absorption spectra for different structures^[119]

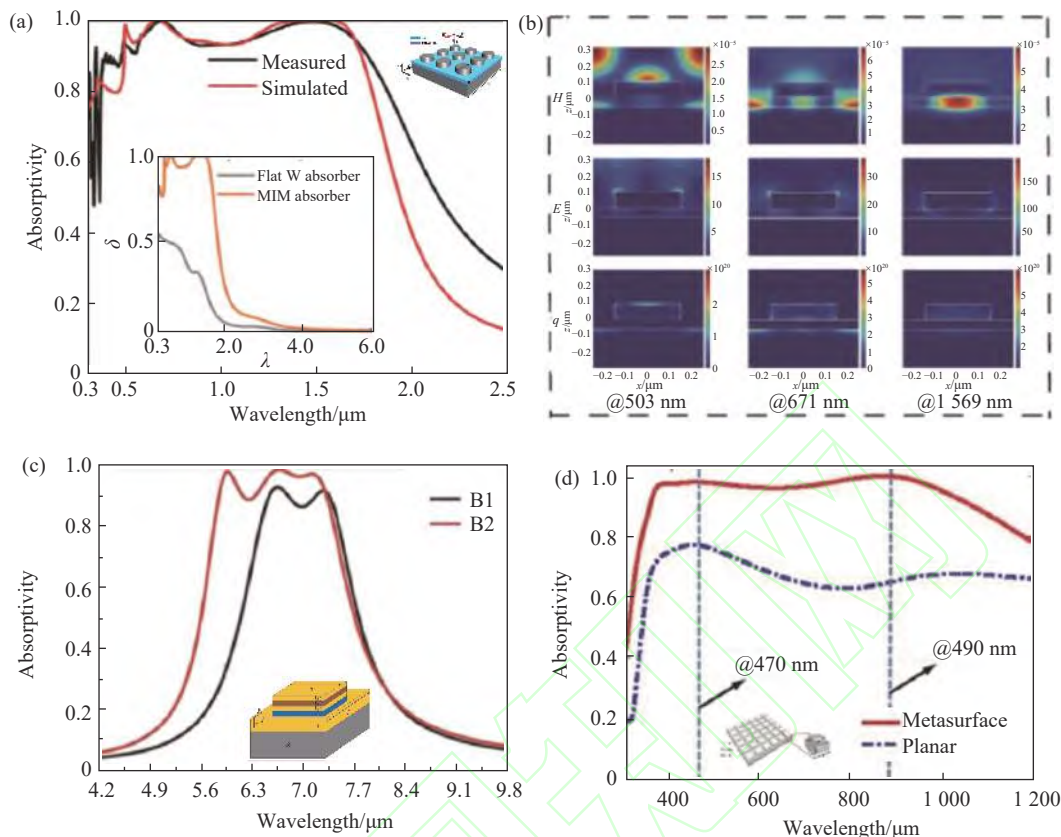


图 17 (a) 纳米盘单元亚波长光栅吸收谱^[123]; (b) 纳米盘单元亚波长光栅电磁场强度和能量损失图^[123]; (c) 多层金属-介质-金属谐振堆栈结构亚波长光栅吸收器吸收谱图^[131]; (d) Ti-SiO₂-Al 结构构成的亚波长光栅太阳能吸收薄膜^[133]

Fig.17 (a) Absorption spectra of subwavelength grating with nanodisk unit^[123]; (b) Field intensity and energy loss of subwavelength grating with nanodisk unit^[123]; (c) Absorption spectra of subwavelength grating absorber with multilayered metal-dielectric-metal resonant stacks^[131]. (d) Subwavelength grating of Ti-SiO₂-Al structure for solar energy absorption film^[133]

场强度,从而形成了环形电流与感应磁场,使得电磁场的能量局域在吸收器中,提高了吸收器的吸收效果^[132]。顶层金属与底层金属不同时,也可以提高其吸收性能,如图 17(d) 所示周期性排列的钛硅(Ti-SiO₂)立方体和铝(Al)底膜,平均吸收率在 354~1066 nm 之间为 97%,同时具备偏振不敏感性及宽角度响应,此结构简单且具有较高的带宽和吸收率。此外,不需要贵金属,亦可使用纳米压印技术制造,易在太阳能的相关场景中得到应用^[133]。

纳米十字型结构的吸收器如图 18(a) 所示,由于该结构具有更多可调的参数,包括长度、宽度和臂的厚度,这些参数共同控制吸收器特性。因此,无论是水平方向上还是竖直方向上叠加,十字形单元所构成的吸收器可以实现超窄频段吸收^[134-135]、双频吸收^[136]和宽频吸收^[137]和多频吸收^[138]。纳米十字型结构吸收器的共振波长主要受纳米臂长度的影响,而吸收峰

的宽度取决于臂宽和周期。这实际上是由于该二维纳米结构激发了传播型表面等离子体共振与局域型表面等离子体共振,可以应用等效电路理论解释。

为了达到宽频的目的,需要不同共振类型及不同共振波长的电磁共振进行叠加,因此,科学家们采用不规则形貌来设计吸收器。比如可以实现偏振无关共振响应的梯形阵列(见图 18(b))^[139]、高温难熔材料 TiN 实现的 400~800 nm 频段的高吸收结构(见图 18(c))^[140]、多个不同大小、形状的亚波长光栅结构^[141-142]、Ti 和 Fe 金属混合吸收器^[143]、铁、金和二氧化硅材料吸收器^[144]以及特殊如图 18(d) 所示的结构^[145]等等。以上这些均可以实现在一定宽带范围内的高吸收,且部分吸收器具有偏振无关和宽的角度响应,适合在光谱成像、太阳能采集、以及光电热能转换方面应用。

除了吸收器单元结构的研究,大面积、低成本的亚波长光栅制备方法也是众多科学家研究的重点,这

也是实现产品商业化的重要基础。目前这类制备方法主要有纳米压印、模板法等。纳米半球形结构的吸收器如图 19(a) 所示, 由于结构具有高对称性, 故具有对入射电磁波偏振态不敏感和对入射角不敏感的特

性^[146-148]。聚光太阳能技术是一种收集太阳能的重要方法, 不同于光伏技术, 它使用热存储来发电, Kiman 等人提出两种平面聚焦采集器, 结构如图 19(b) 所示, 即超表面 (MPFC) 和菲涅尔透镜表面 (FPFC), 采用

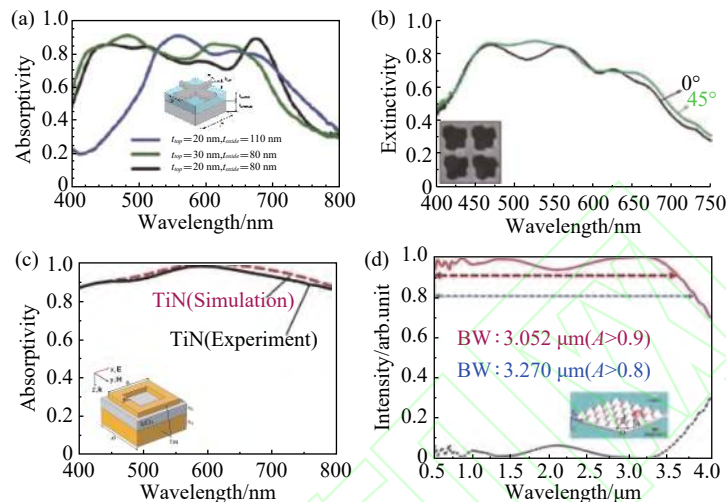


图 18 (a) 不同参数的 Ag-SiO₂-Ag 十字形结构的亚波长光栅结构的吸收谱图^[135]; (b) 梯形阵列结构亚波长光栅及其消光谱^[139]; (c) 环形阵列结构及其吸收谱^[140]; (d) 锥形亚波长光栅吸收器吸收谱^[145]

Fig.18 (a) Measured absorption spectra of fabricated Ag-SiO₂-Ag cross structure of subwavelength grating with different parameters^[135]; (b) Extinction spectra using crossed trapezoid array subwavelength meta-grating^[139]; (c) Absorption spectra of ring array structure^[140]; (d) Absorption spectra of subwavelength grating of cone unit structure^[145]

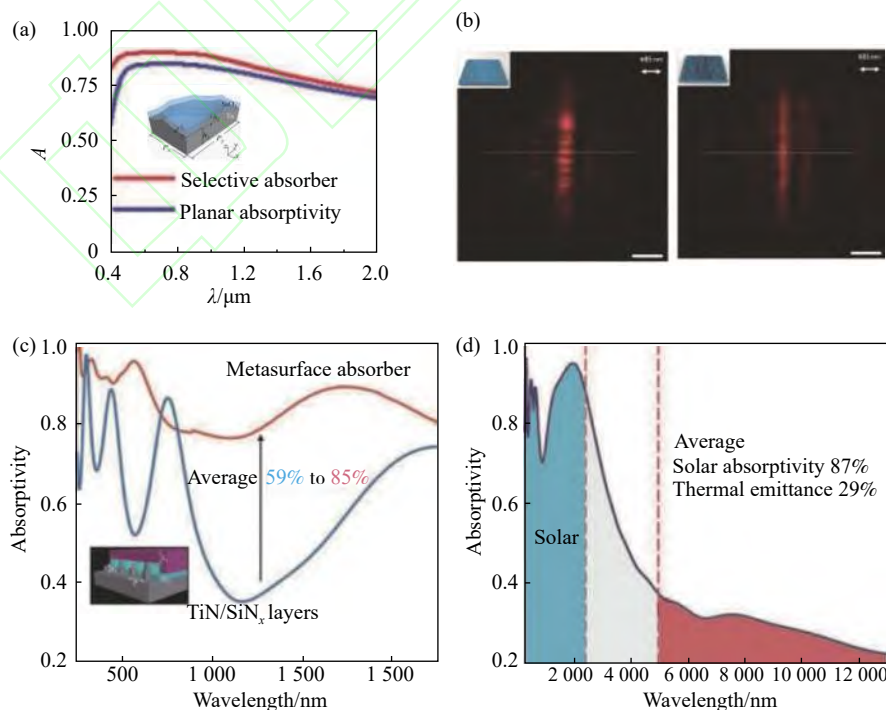


图 19 (a) SiO₂-Ge-W 结构及其吸收谱图^[146]; (b) 实验焦线强度的剖面图^[149]; (c)-(d) SiN_x-TiN-SiO₂ 结构及吸收谱图^[150]

Fig.19 (a) Structure and its absorption spectrum of SiO₂-Ge-W^[146]; (b) Experimentally obtained focal line intensity profiles^[149]; (c)-(d) Structure and its absorption spectrum of SiN_x-TiN-SiO₂^[150]

3D 多光子刻蚀技术制备母板,之后采用纳米压印的方法制备样品,MPFC 具有更精准的控制,但 FPFC 具有更好的扩展性,以加州市场为参考,对 FPFC 进行了经济技术分析,年度光学效率可以达到约 40%,高于天然气的竞争指标 (30%),具有工业应用的前景^[149]。2019 年, Linsen Chen 等人提出如图 19(d) 所示结构, SiO₂ 纳米柱阵列被 TiN 包裹,然后被 SiN_x 层覆盖, SiO₂ 纳米柱阵列可以在可见光波段实现近似完美吸收,该超表面采用快速、可伸缩、连续可变空间频率光刻技术制备,实验制备了面积为 10 mm×30 mm 的样品^[150]。

3.4 其他领域应用

文中主要综述了亚波长光栅及超构光栅在生物传感、滤光片光谱调控和吸收薄膜等三个方面的应用。主要介绍了在这三个应用领域的主要代表性工作,同时亚波长光栅以及超构光栅在其它领域也有潜在的重要应用,比如用于光电子集成平台的垂直腔面发射激光器和高 Q 值谐振器^[16]、激光雷达和光通信平台的光束偏转^[151]等等,由于篇幅限制不能一一赘述,可以参考上述文献。

4 结论与展望

亚波长光栅由于其独特的光束调控特性,在传感、滤波、吸收薄膜、激光器等方面具有重要应用。众多的科学家在这方面进行了大量的研究,发展了基本的理论体系并挖掘了亚波长光栅所拥有特性满足的应用领域。相比而言,作为从亚波长光栅结合超构原子衍生的超构光栅,应用研究较少,仍旧还是处于研究的初级阶段,主要集中在超构光栅单元设计以及如何控制衍射级输出的物理机制研究和分析。因此,由于其独特的结合光栅周期性和超构原子调控的特性,超构光栅在理论设计及其应用前景具有很大的提升空间。

(1) 理论分析新理论和新方法

在亚波长光栅和超构表面基础之上提出的超构光栅,现阶段基本理论分析方法是严格理论方法如经典微分法、虚拟源法、有限元法、格林函数法、严格耦合波理论等,但是这些方法基于麦克斯韦方程,对于计算要求较高。因此,理论研究和分析仍旧是众多科学家的探索和研究方向,意在探寻一种有效的亚波

长光栅和超构光栅理论分析模型和方法,特别是针对超构光栅的理论研究和分析^[152]。

(2) 目标化的超构光栅单元设计方法

超构光栅其独特性正是体现在单元设计上。现阶段,超构光栅的单元设计更多的是基于正向的多次尝试的方法,虽然这种方法可以在一定程度上满足设计要求。但是随着应用的拓展,现阶段的设计方法难以满足目标化的设计,因此,需要在基于超构光栅理论分析模型上发展逆向设计方法^[21],在更大程度上可以满足应用的需求,反过来也可以推动超构光栅在各个领域的应用。

(3) 大面积、低成本的制备方法

在前面的叙述中,知道了多个领域的潜在应用,但是现阶段各种的应用仍旧处于实验室的研究和验证阶段,如果需要实际应用,大面积和低成本的制备必不可少,已经成为了众多科学家研究的重点和难点,这也是实现产品商业化的重要基础。目前这类制备方法主要有纳米压印、模板法等,但仍旧还只是处于初步阶段。因此,大面积和低成本的亚波长光栅和超构光栅制备方法是本领域进一步研究重点。

参考文献:

- [1] Loewen E G, Popov E. Diffraction gratings and Applications (Optical Science and Engineering)[M]. New York: CRC Press, 1997.
- [2] Koenderink A F, Alu A, Polman A. Nanophotonics: shrinking light-based technology [J]. *Science*, 2015, 348(6234): 516-521.
- [3] Collin S. Nanostructure arrays in free-space: optical properties and applications [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2014, 77(12): 126402.
- [4] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index [J]. *Science*, 2004, 305(5685): 788-792.
- [5] Cai W, Chettiar U K, Kildishev A V, et al. Optical cloaking with metamaterials [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(4): 224.
- [6] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces [J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [7] Ra'di Y, Sounas D L, Alu A. Metagratings: beyond the limits of graded metasurfaces for wave front control [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(6): 067404.
- [8] Bonod N, Jérôme N. Diffraction gratings: from principles to

- applications in high-intensity lasers [J]. *Advanced Optics Photonics*, 2016, 8(1): 156-199.
- [9] Nevier M, Popov E. Light Propagation in Periodic Media: Differential Theory and Design[M]. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [10] Quaranta G, Basset G, Martin O J F, et al. Recent advances in resonant waveguide gratings [J]. *Laser & Photonics Review*, 2018, 12(9): 1800017.1-1800017.31.
- [11] Wang S S, Magnusson R. Theory and applications of guided-mode resonance filters [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(14): 2606-2613.
- [12] Magnusson R, Wang S S. New principle for optical filters [J]. *Applied Physical Letters*, 1992, 61(9): 1022-1024.
- [13] Chang-Hasnain C J. High-contrast gratings as a new platform for integrated optoelectronics [J]. *Semiconductor Science & Technology*, 2010, 26(26): 014043.
- [14] Zhu Li, Yang Weijian, ChangHasnain C J. Very high efficiency optical coupler for silicon nanophotonic waveguide and single mode optical fiber [J]. *Optics Exp*, 2017, 25(15): 18462-18473.
- [15] Karagodsky V, Sedgwick F G, ChangHasnain C J. Theoretical analysis of subwavelength high contrast grating reflectors [J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 16973-16988.
- [16] Chang-Hasnain C J, Yang W. High-contrast gratings for integrated optoelectronics [J]. *Advances in Optics & Photonics*, 2012, 4(3): 379-440.
- [17] Popov V, Boust F, Burokur S N, et al. Constructing the near field and far field with reactive metagratings: study on the degrees of freedom [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(2).
- [18] Ra 'di, Y, Alù A. Reconfigurable metagratings [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1779-1785.
- [19] Fan Z, Shcherbakov M R, Allen M, et al. Perfect diffraction with multiresonant bianisotropic metagratings [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(11): 4303-4311.
- [20] Deng Zilan, Cao Yaoyu, Li Xiangping, et al. Multifunctional metasurface: from extraordinary optical transmission to extraordinary optical diffraction in a single structure: publisher's note [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(7): 6.
- [21] Sell D, Yang J, Doshay S, et al. Large-angle, multifunctional metagratings based on freeform multimode geometries [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(6): 3752-3757.
- [22] Sell D, Yang J, Wang E W, et al. Ultra-high-efficiency anomalous refraction with dielectric metasurfaces [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(6): 2402-2407.
- [23] Khaidarov E, Hao H, Paniaguadominguez R, et al. Asymmetric nanoantennas for ultrahigh angle broadband visible light bending [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(10): 6267-6272.
- [24] Deng ZiLan, Deng Junhong, Zhuang Xin, et al. Facile metagrating holograms with broadband and extreme angle tolerance [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(1): 78.
- [25] Epstein A, Rabinovich O. Perfect anomalous refraction with metagratings[C]//European Conference on Antennas and Propagation, 2018.
- [26] Fu Yangyang, Shen Chen, Cao Yanyan, et al. Reversal of transmission and reflection based on acoustic metagratings with integer parity design [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2326-2332.
- [27] Shi Tan, Wang Yujie, Deng Zilan, et al. All - dielectric kissing-dimer metagratings for asymmetric high diffraction [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(24): 1901389.
- [28] Liu Weinan, Chen Rui, Shi Weiyl, et al. Narrow-frequency sharp-angular filters using all-dielectric cascaded metagratings [J]. *Nanophotonics*, 2020: 20200141.
- [29] Zhang Lei, Mei Shengtao, Huang Kun, et al. Advances in full control of electromagnetic waves with metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(6): 818-833.
- [30] Bonod N, Neauport J. Diffraction gratings: from principles to applications in high-intensity lasers [J]. *Advances in Optics & Photonics*, 2016, 8: 156-199.
- [31] Pierce J R. Coupling of modes of propagation [J]. *Journal of Applied Physics*, 1954, 25(2): 179-183.
- [32] Collin Stéphane. Nanostructure arrays in free-space: Optical properties and applications [J]. *Reports on Progress in Physics Physical Society*, 2014, 77(12): 126402.
- [33] Quaranta G, Basset G, Martin O J F, et al. Recent advances in resonant waveguide gratings [J]. *Laser & Photonics Review*, 2018, 12(9): 1800017.
- [34] Deng Zilan, Zhang Shuang, Wang Guoping. A facile grating approach towards broadband, wide-angle and high-efficiency holographic metasurfaces [J]. *Nanoscale*, 2016, 8: 1588.
- [35] Liu W, Kivshar Y S. Generalized Kerker effects in nanophotonics and meta-optics [Invited] [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13085-13105.
- [36] Chang-Hasnain C J, Yang W. High-contrast gratings for integrated optoelectronics [J]. *Advances in Optics & Pho-*

- tonics*, 2012, 4(3): 379-440.
- [37] Yang W. High-contrast gratings for integrated optoelectronics [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2012, 4(3): 379-440.
- [38] Wang Zhaorong, Zhang Bo, Deng Hui, et al. Dispersion engineering for vertical microcavities using subwavelength gratings [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(7): 073601.
- [39] Liu Wenxing, Yu Tianbao, Sun Yong, et al. Highly efficient broadband wave plates using dispersion-engineered high-index-contrast subwavelength gratings [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(6): 064005.
- [40] Epstein A, Rabinovich O. Perfect anomalous refraction with metagratings[C]//European Conference on Antennas and Propagation, 2018.
- [41] Popov V, Boust F, Burokur S N, et al. Controlling diffraction patterns with metagratings [J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(1): 011002.
- [42] Rabinovich O, Kaplon I, Reis J, et al. Experimental demonstration and in-depth investigation of analytically designed anomalous reflection metagratings [J]. *Physical Review B*, 2019, 99(12): 125101.
- [43] Epstein A, Rabinovich O. Unveiling the properties of metagratings via a detailed analytical model for synthesis and analysis [J]. *Physical Review Applied*, 2017, 8(5): 054037.
- [44] Rabinovich O, Epstein A. Analytical design of printed circuit board (pcb) metagratings for perfect anomalous reflection [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(8): 4086-4095.
- [45] Popov V, Boust F, Burokur S N, et al. Constructing the near field and far field with reactive metagratings: study on the degrees of freedom [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(2): 024074.
- [46] Chalabi H, Ra'Di Y, Sounas D L, et al. Efficient anomalous reflection through near-field interactions in metasurfaces [J]. *Physical Review B*, 2017, 96(7): 075432.
- [47] Patri A, Kenacohen S, Caloz C, et al. Large-angle, broadband and multifunctional directive waveguide scatterer gratings [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(12): 3298-3305.
- [48] Yang J, Sell D, Fan J A, et al. Freeform metagratings based on complex light scattering dynamics for extreme, high efficiency beam steering [J]. *Annalen der Physik*, 2018, 530(1): 1700302.
- [49] Liu W, Miroshnichenko A E. Beam steering with dielectric metalattices [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1733-1741.
- [50] Shi Weiyi, Deng Weimin, Liu Weinan, et al. Rectangular dielectric metagrating for high-efficiency diffraction with large-angle deflection [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(7): 073601.
- [51] Neder V, Ra'di Y, Alù A, et al. Combined metagratings for efficient broad-angle scattering metasurface [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(4): 1010-1017.
- [52] Uleman F, Neder V, Cordaro A, et al. Resonant metagratings for spectral and angular control of light for colored rooftop photovoltaics [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2020, 3(4): 3150-3156.
- [53] Tiefenthaler K, Lukosz W. Integrated optical switches and gas sensors [J]. *Optics Letters*, 1984, 9: 137.
- [54] Norton S M, Morris G M, Erdogan T, et al. Experimental investigation of resonant-grating filter lineshapes in comparison with theoretical models [J]. *Journal of The Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 1998, 15(2): 464-472.
- [55] Yih J, Chu Y, Mao Y, et al. Optical waveguide biosensors constructed with subwavelength gratings [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(9): 1938-1942.
- [56] Wawro D, Tibuleac S, Magnusson R, et al. Optical fiber endface biosensor based on resonances in dielectric waveguide gratings[C]//SPIE, 2000, 3911: 86-94.
- [57] Cunningham B T, Li P, Lin B, et al. Colorimetric resonant reflection as a direct biochemical assay technique [J]. *Sensors and Actuators B-chemical*, 2002, 81(2): 316-328.
- [58] Lin B, Qiu J, Gerstenmeier J, et al. A label-free optical technique for detecting small molecule interactions [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2002, 17(9): 827-834.
- [59] Cunningham B T, Lin B, Qiu J, et al. A plastic colorimetric resonant optical biosensor for multiparallel detection of label-free biochemical interactions [J]. *Sensors and Actuators B-chemical*, 2002, 85(3): 219-226.
- [60] Cunningham B T, Li P, Schulz S C, et al. Label-free assays on the bind system [J]. *Journal of Biomolecular Screening*, 2004, 9(6): 481-490.
- [61] Fang Y, Ferrie A M, Fontaine N H, et al. Resonant waveguide grating biosensor for living cell sensing [J]. *Biophysical Journal*, 2006, 91(5): 1925-1940.
- [62] Omalley S M, Xie X, Frutos A G, et al. Label-free high-

- throughput functional lytic assays [J]. *Journal of Biomolecular Screening*, 2007, 12(1): 117-125.
- [63] Walia J, Dhindsa N, Khorasaninejad M, et al. Color generation and refractive index sensing using diffraction from 2d silicon nanowire arrays [J]. *Small*, 2014, 10(1): 144-151.
- [64] Hermannsson P G, Vannahme C, Smith C L, et al. Absolute analytical prediction of photonic crystal guided mode resonance wavelengths [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(7): 071103.
- [65] Wang Yongjin, Chen Jiajia, Shi Zheng, et al. Suspended membrane GaN gratings for refractive index sensing [J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(5): 052201.
- [66] Marciniak M, Gębski M, Dems M, et al. Subwavelength high contrast gratings as optical sensing elements [J]. *Scientific Bulletin. Physics / Technical University of Łódź*, 2017, 38: 61-70.
- [67] Sahoo P K, Sarkar S, Joseph J, et al. High sensitivity guided-mode-resonance optical sensor employing phase detection [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 7607-7607.
- [68] Ganesh N, Zhang W, Mathias P C, et al. Enhanced fluorescence emission from quantum dots on a photonic crystal surface [J]. *Nature Nanotechnology*, 2007, 2(8): 515-520.
- [69] Ganesh N, Mathias P C, Zhang W, et al. Distance dependence of fluorescence enhancement from photonic crystal surfaces [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(8): 083104.
- [70] Kano H, Kawata S. Two-photon-excited fluorescence enhanced by a surface plasmon. [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(22): 1848-1850.
- [71] Wenseleers W, Stellacci F, Meyerfriedrichsen T, et al. Five orders-of-magnitude enhancement of two-photon absorption for dyes on silver nanoparticle fractal clusters [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2002, 106(27): 6853-6863.
- [72] Soria S, Katchalski T, Teitelbaum E, et al. Enhanced two-photon fluorescence excitation by resonant grating waveguide structures [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(17): 1989-1991.
- [73] André Selle, Kappel C, Bader M A, et al. Picosecond-pulse-induced two-photon fluorescence enhancement in biological material by application of grating waveguide structures [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(13): 1683-1685.
- [74] Soria S, Badenes G, Bader M A, et al. Resonant double grating waveguide structures as enhancement platforms for two-photon fluorescence excitation [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(8): 081109.
- [75] Thayil A, Muriano A, Salvador J P, et al. Nonlinear immunofluorescent assay for androgenic hormones based on resonant structures [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13315-13322.
- [76] Nazirizadeh Y, Bog U, Sekula S, et al. Low-cost label-free biosensors using photonic crystals embedded between crossed polarizers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 19120-19128.
- [77] Nazirizadeh Y, Behrends V, Prosz A, et al. Intensity interrogation near cutoff resonance for label-free cellular profiling [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 24685-24685.
- [78] Jahns S, Brau M, Meyer B, et al. Handheld imaging photonic crystal biosensor for multiplexed, label-free protein detection. [J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, 6(10): 3724-3736.
- [79] Li H, Hsu W, Liu K, et al. A low cost, label-free biosensor based on a novel double-sided grating waveguide coupler with sub-surface cavities [J]. *Sensors and Actuators B-chemical*, 2015: 371-380.
- [80] Lin Y, Hsieh W, Chau L, et al. Intensity-detection-based guided-mode-resonance optofluidic biosensing system for rapid, low-cost, label-free detection [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2017: 659-666.
- [81] McMahon J M, Henzie J, Odom T W, et al. Tailoring the sensing capabilities of nanohole arrays in gold films with Rayleigh anomaly-surface plasmon polaritons [J]. *Optics Express*, 2007, 15(26): 18119-18129.
- [82] Sun L B, Hu X L, Xu Y, et al. Influence of structural parameters to polarization-independent color-filter behavior in ultrathin Ag films [J]. *Optics Communications*, 2014, 333(15): 16-21.
- [83] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays [J]. *Nature*, 1998, 391(6668): 667-669.
- [84] Ghaemi H F, Thio T, Grupp D E, et al. Surface plasmons enhance optical transmission through subwavelength holes [J]. *Physical Review B*, 1998, 58(11): 6779-6782.
- [85] Chen Q, Cumming D R. 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.
- [86] Chen Q, Das D, Chitnis D, et al. A CMOS image sensor integrated with plasmonic colour filters [J]. *Plasmonics*, 2012,

- 7(4): 695-699.
- [87] Yokogawa S, Burgos S P, Atwater H A, et al. Plasmonic color filters for CMOS image sensor applications [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(8): 4349-4354.
- [88] 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.
- [89] Burgos S P, Yokogawa S, Atwater H A. Color imaging via nearest neighbor hole coupling in plasmonic color filters integrated onto a complementary metal-oxide semiconductor image sensor [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(11): 10038-10047.
- [90] Horie Y, Han S, Lee J, 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.
- [91] Mahani F F, Mokhtari A, Mehran M, et al. Dual mode operation, highly selective nanohole array-based plasmonic colour filters [J]. *Nanotechnology*, 2017, 28(38): 385203.
- [92] Tang L, Latif S, Miller D A, et al. Plasmonic device in silicon CMOS [J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(13): 706-708.
- [93] Balaur E, Sadatnajafi C, Kou S S, et al. Continuously tunable, polarization controlled, colour palette produced from nanoscale plasmonic pixels [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 28062-28062.
- [94] Yu Yan, Chen Qin, Wen Long, et al. Spatial optical crosstalk in CMOS image sensors integrated with plasmonic color filters [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 21994-22003.
- [95] Knop K. Diffraction gratings for color filtering in the zero diffraction order [J]. *Applied Optics*, 1978, 17(22): 3598-3603.
- [96] Ganesh N, Xiang A, Beltran N B, et al. Compact wavelength detection system incorporating a guided-mode resonance filter [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(8): 81103.
- [97] Duempelmann L, Gallinet B, Novotny L, et al. Multispectral imaging with tunable plasmonic filters [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(2): 236-241.
- [98] Zeng B, Gao Y, Bartoli F J, et al. Ultrathin nanostructured metals for highly transmissive plasmonic subtractive color filters [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 2840-2840.
- [99] Shrestha V R, Lee S, Kim E, et al. polarization-tuned dynamic color filters incorporating a dielectric-loaded aluminum nanowire array [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 12450-12450.
- [100] Wang J, Fan Q, Zhang S, et al. Ultra-thin plasmonic color filters incorporating free-standing resonant membrane waveguides with high transmission efficiency [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(3): 31110.
- [101] Lee K, Jang J Y, Park S J, et al. Angle - insensitive and CMOS-compatible subwavelength color printing [J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(11): 1696-1702.
- [102] Koirala I, Shrestha V R, Park C, et al. All dielectric transmissive structural multicolor pixel incorporating a resonant grating in hydrogenated amorphous silicon. [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 13574.
- [103] Koirala I, Shrestha V R, Park C, et al. Polarization-controlled broad color palette based on an ultrathin one-dimensional resonant grating structure [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 40073.
- [104] Crozier K B, Seo K, Park H, et al. controlling the light absorption in a photodetector via nanowire waveguide resonances for multispectral and color imaging [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(6): 1-12.
- [105] Seo K, Wober M, Steinvurzel P, et al. Multicolored vertical silicon nanowires [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(4): 1851-1856.
- [106] Park H, Dan Y, Seo K, et al. Filter-free image sensor pixels comprising silicon nanowires with selective color absorption [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(4): 1804-1809.
- [107] Yoon J, Kim K, Meyyappan M, et al. Optical characteristics of silicon-based asymmetric vertical nanowire photodetectors [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, 64(5): 2261-2266.
- [108] Yue W, Gao S, Lee S, et al. Subtractive color filters based on a silicon-aluminum hybrid-nanodisk metasurface enabling enhanced color purity [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 29756-29756.
- [109] Park C, Shrestha V R, Yue W, et al. Structural color filters enabled by a dielectric metasurface incorporating hydrogenated amorphous silicon nanodisks [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2556-2556.
- [110] Park C, Koirala I, Gao S, et al. Structural color filters based on an all-dielectric metasurface exploiting silicon-rich silicon nitride nanodisks [J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 667-679.
- [111] Miyata M, Nakajima M, Hashimoto T, et al. High-sensitivity color imaging using pixel-scale color splitters based on

- dielectric metasurfaces [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(6): 1442-1450.
- [112] Vashistha V, Vaidya G, Gruszecki P, et al. Polarization tunable all-dielectric color filters based on cross-shaped Si nanoantennas [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 8092.
- [113] Yang Bo, Liu Wenwei, Li Zhancheng, et al. Polarization-sensitive structural colors with hue-and-saturation tuning based on all-dielectric nanopixels [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(4): 1701009.
- [114] Dan A, Barshilia H C, Chattopadhyay K, et al. Solar energy absorption mediated by surface plasma polaritons in spectrally selective dielectric-metal-dielectric coatings: A critical review [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 79: 1050-1077.
- [115] Khodasevych I, Wang L, Mitchell A, et al. Micro- and nanostructured surfaces for selective solar absorption [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(7): 852-881.
- [116] Cui Yanxia, He Yingran, Jin Yi, et al. Plasmonic and metamaterial structures as electromagnetic absorbers [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(4): 495-520.
- [117] Zhao Bin, Hu Mingke, Ao Xianze, et al. Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects [J]. *Applied Energy*, 2019: 489-513.
- [118] Cui Yanxia, Fung Kung Hin, Xu Jun, et al. Ultrabroadband light absorption by a sawtooth anisotropic metamaterial slab [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(3): 1443-1447.
- [119] Li Yuyin, Liu Zhengqi, Zhang Houjiao, et al. Ultra-broadband perfect absorber utilizing refractory materials in metal-insulator composite multilayer stacks [J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 11809-11818.
- [120] Li Junyu, Bao Li, Jiang Shun, et al. Inverse design of multifunctional plasmonic metamaterial absorbers for infrared polarimetric imaging [J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8375-8386.
- [121] Lin H, Sturmberg B C, Lin K, et al. A 90-nm-thick graphene metamaterial for strong and extremely broadband absorption of unpolarized light [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(4): 270-276.
- [122] Luo M, Shen S, Zhou L, et al. Broadband, wide-angle, and polarization-independent metamaterial absorber for the visible regime [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16715-16724.
- [123] Han X, He K, He Z, et al. Tungsten-based highly selective solar absorber using simple nanodisk array [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): A1072-A1078.
- [124] Nielsen M G, Pors A, Albrechtsen O, et al. Efficient absorption of visible radiation by gap plasmon resonators [J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13311-13319.
- [125] Mann S A, Garnett E C. Resonant nanophotonic spectrum splitting for ultrathin multijunction solar cells [J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(7): 816-821.
- [126] Chang C, Kortkamp W J, Nogan J, et al. High-temperature refractory metasurfaces for solar thermophotovoltaic energy harvesting [J]. *Nano Letters*, 2018, 18(12): 7665-7673.
- [127] Zhang Nan, Zhou Peihong, Cheng Dengmu, et al. Dual-band absorption of mid-infrared metamaterial absorber based on distinct dielectric spacing layers [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(7): 1125-1127.
- [128] Cattoni A, Ghenuche P, Haghiri-gosnet A M, et al. $\lambda/1000$ plasmonic nanocavities for biosensing fabricated by soft uv nanoimprint lithography [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(9): 3557-3563.
- [129] Zhao Bo, Wang Liping, Shuai Yong, et al. Thermophotovoltaic emitters based on a two-dimensional grating/thin-film nanostructure [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 67: 637-645.
- [130] Zhang B, Hendrickson J, Guo J. Multispectral near-perfect metamaterial absorbers using spatially multiplexed plasmon resonance metal square structures [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(3): 656.
- [131] Zhang Nan, Zhou Peiheng, Wang Shuya, et al. Broadband absorption in mid-infrared metamaterial absorbers with multiple dielectric layers [J]. *Optics Communications*, 2015, 338: 388-392.
- [132] Wu C, Neuner B, Shvets G, et al. Large-area, wide-angle, spectrally selective plasmonic absorber [J]. *Physical Review B*, 2011, 84(7): 075102.
- [133] Lei L, Li S, Huang H, et al. Ultra-broadband absorber from visible to near-infrared using plasmonic metamaterial. [J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5686-5693.
- [134] Kang S, Qian Z, Rajaram V, et al. Ultra - narrowband metamaterial absorbers for high spectral resolution infrared spectroscopy [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(2): 1801236.1-1801236.8.
- [135] Butun S, Aydin K. Structurally tunable resonant absorption bands in ultrathin broadband plasmonic absorbers [J]. *Optics*

- Express*, 2014, 22(16): 19457-19468.
- [136] Liu X, Tyler T, Starr T, et al. Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters. [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(4): 045901.
- [137] Ma Wei, Wen Yongzheng, Yu Xiaomei, et al. Broadband metamaterial absorber at mid-infrared using multiplexed cross resonators [J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30724-30730.
- [138] Grant J, Mccrindle I J, Li C, et al. Multispectral metamaterial absorber [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1227-1230.
- [139] Aydin K, Ferry V E, Briggs R M, et al. Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers [J]. *Nature Communications*, 2011, 2(1): 517.
- [140] Li W, Guler U, Kinsey N, et al. Refractory plasmonics with titanium nitride: broadband metamaterial absorber [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(47): 7959-7965.
- [141] Nagarajan A, Vivek K, Shah M, et al. A broadband plasmonic metasurface superabsorber at optical frequencies: analytical design framework and demonstration [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(16): 1800253.
- [142] Muhammad N, Tang X, Tao F, et al. Broadband polarization-insensitive absorption by metasurface with metallic pieces for energy harvesting application [J]. *Materials Science and Engineering B-advanced Functional Solid-state Materials*, 2019, 249: 114419.
- [143] Liu Jign, Chen Wei, Zheng Jiachun, et al. Wide-angle polarization-independent ultra-broadband absorber from visible to infrared [J]. *Nanomaterials*, 2019, 10(1): 27.
- [144] Wu Dong, Liu Chang, Liu Yumin, et al. Numerical study of an ultra-broadband near-perfect solar absorber in the visible and near-infrared region [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 450-453.
- [145] Liu Z, Tang P, Liu X, et al. Truncated titanium/semiconductor cones for wide-band solar absorbers [J]. *Nanotechnology*, 2019, 30(30): 305203.
- [146] Chi Kequn, Yang Liu, Liu Zhaolang, et al. Large-scale nanostructured low-temperature solar selective absorber [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(10): 1891-1894.
- [147] Chi K, Yang L, He S, et al. Ultrathin nanostructured solar selective absorber based on a two-dimensional hemispherical shell array [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(6): 063903.
- [148] Zhang Z, Mo Y, Wang H, et al. High-performance and cost-effective absorber for visible and near-infrared spectrum based on a spherical multilayered dielectric-metal structure [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(16): 4467-4473.
- [149] Ding Q, Barna S F, Jacobs K, et al. Feasibility analysis of nanostructured planar focusing collectors for concentrating solar power applications [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2018, 1(12): 6927-6935.
- [150] Wu Shangliang, Ye Yan, Jiang Zhouying, et al. Large - area, ultrathin metasurface exhibiting strong unpolarized ultrabroadband absorption [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(24): 1901162.
- [151] Yang Weijian, Sun Tianbo, Rao Yi, et al. High speed optical phased array using high contrast grating all-pass filters. [J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 20038-20044.
- [152] Zhang Ziyang, Kang Ming, Zhang Xueqian, et al. Coherent perfect diffraction in metagratings [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(36): 2002341.