中国光学
Chinese Optics
核心期刊

氮化硅光子器件与应用研究进展

范智斌 陈泽茗 周鑫 何辛涛 江绍基 董建文

Recent advances in silicon nitride-based photonic devices and applications

FAN Zhi-bin, CHEN Ze-ming, ZHOU Xin, HE Xin-tao, JIANG Shao-ji, DONG Jian-wen

引用本文:
范智斌, 陈泽茗, 周鑫, 何辛涛, 江绍基, 董建文. 氮化硅光子器件与应用研究进展[J]. 中国光学, 2021, 14(4): 998−1018. doi: 10.37188/CO.2021−0093
FAN Zhi-bin, CHEN Ze-ming, ZHOU Xin, HE Xin-tao, JIANG Shao-ji, DONG Jian-wen. Recent advances in silicon nitride-based photonic devices and applications[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 998-1018. doi: 10.37188/CO.2021-0093

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2021−0093

中国光学
Chinese Optics

文章编号 2095-1531(2021)04-0998-21

氮化硅光子器件与应用研究进展

范智斌[1,2], 陈泽茗[1,2], 周 鑫[1,2], 何辛涛[1,2], 江绍基[1,2], 董建文[1,2*]
(1. 中山大学 物理学院，广东 广州 510275；
2. 中山大学 光电材料与技术国家重点实验室，广东 广州 510275)

摘要: 氮化硅材料提供了一种与 CMOS 兼容的集成光子平台,具有丰富的光学特性。通过调节相关制备参数,可以获得特定折射率的薄膜材料,且消光系数和非线性系数具有较大可调控范围。因此,氮化硅材料在薄膜光学、微纳平面光学、非线性集成光学等诸多领域具有广泛的应用前景。本文主要介绍氮化硅材料的光学特性及其在光学薄膜、微纳超构材料和硅光集成器件方面的研究现状,综述氮化硅材料在太阳能薄膜、可见光超构表面、光栅耦合器和非线性光波导等应用领域的研究概况。

关 键 词: 氮化硅;超构表面;光学薄膜;光栅耦合器;非线性光波导
中图分类号: O439 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2021-0093

Recent advances in silicon nitride-based photonic devices and applications

FAN Zhi-bin[1,2], CHEN Ze-ming[1,2], ZHOU Xin[1,2], HE Xin-tao[1,2], JIANG Shao-ji[1,2], DONG Jian-wen[1,2*]
(1. *School of Physics*, *Sun Yat-sen University*, *Guangzhou* 510275, *China*;
2. *State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies*,
Sun Yat-sen University, *Guangzhou* 510275, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *dongjwen@mail.sysu.edu.cn*

Abstract: Silicon nitride provides a CMOS-compatible integrated photonic platform with rich optical properties. By adjusting the relevant fabrication parameters, silicon nitride with specific refractive index between 1.9~3.2 can be achieved, and its extinction and nonlinear coefficient can have a large adjustable range. Silicon nitride has wide potential applications in many fields such as thin film optics, micro-nano planar optics and nonlinear integrated photonics. In this paper, we review the optical properties of silicon nitride and its recent advances in optical film, micro-nano metamaterial and silicon photonics, and also review the research progresses on the applications of solar thin films, visible metasurfaces, grating couplers and nonlinear optical waveguides.

Key words: silicon nitride; metasurface; optical film; grating coupler; nonlinear optical waveguide

---

收稿日期: 2021-04-25; **修订日期:** 2021-06-08
基金项目: 国家自然科学基金(No. 62035016, No. 61805288, No. 11904421);广东省基础与应用基础研究基金区域联合基金项目(No. 2020A1515110661)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62035016, No. 61805288, No. 11904421); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No. 2020A1515110661)

1 引　言

氮化硅(Silicon Nitride)是由硅元素和氮元素构成的无机化合物,其研制主要依靠人工条件合成。除了常见的普通氮化硅(Si_3N_4)外,根据不同的反应条件和纯化方法,还能高温合成一氮化二硅(Si_2N)、三氮化二硅(Si_2N_3)等氮化程度不同的氮化硅。氮化硅是一种重要的结构陶瓷材料,在日常生活中也常见到氮化硅陶瓷,其在热学、力学和化学等方面有着广阔的发展前景。在热学方面,氮化硅在空气中的分解温度为 1800 ℃,且具有较高的强度和抗冲击性,1200 ℃ 以上随时间增加才会出现破损;其热膨胀系数较小,约为 $(2.9\sim3.6)\times10^{-6}$/℃,导热系数高,从而耐热冲击性好,加热到 1000 ℃ 后投入冷水中也不会开裂[1-2]。在力学方面,氮化硅的摩擦系数小,具有自润滑性[3];其硬度高,耐磨损,莫氏硬度为 9,仅次于金刚石、碳化硅等高硬度材料,具有抗机械冲击特性[4];脆性大,通过添加多壁碳纳米管、Y_2O_3 和 Al_2O_3 等烧结添加剂,利用添加剂颗粒的拉拔和弹性桥联机制可增强氮化硅陶瓷的韧性[5-7]。在化学方面,氮化硅化学性质稳定,耐腐蚀,除氢氟酸外不与其他无机酸反应,超过 800 ℃ 会在表面生成氧化硅膜,随着温度升高氧化硅膜逐渐变稳定,1070 ℃ 左右可与氧生成致密氧化硅膜,至 1400 ℃ 都可以基本保持稳定[1, 8-9];且氮化硅作为共价键化合物,很难致密,比重小,密度约为 3.1~3.2 g/cm^3,比钛合金密度(~4.5 g/cm^3)要低,而不同的成型方法和气体比例下,氮化硅的密度也会不一样[4, 10]。正是由于氮化硅陶瓷材料耐热、抗冷热冲击、硬度高、耐磨损、韧性较高,且具有自润滑性、耐腐蚀、化学性质稳定等优异的特性,它能够被应用于传统金属材料所不能适应匹配的极端环境,其制成的氮化硅轴承球、涡轮转子、陶瓷刀具等零部件产品也已经被应用于航天军工、机械工程、高性能机床以及化工等现代科学技术和工业领域。

近年来,氮化硅作为一种常见的 CMOS 兼容的光学薄膜介质材料,其光学上的特性开始受到越来越多关注。氮化硅的折射率介于二氧化硅和硅之间,具有较低的折射率、较大的能带间隙和大范围的透明光学窗口,该窗口覆盖可见光到中红外波段,意味着普通氮化硅材料具有宽带低吸收特性,在集成光子器件中能实现宽带低损耗的功能。而通过在制备过程中调节相关气体参数,还能制备出保留了普通氮化硅光学特性的、折射率相对较高的富硅氮化硅薄膜材料,从而使得氮化硅材料的折射率范围扩展到了 1.9~3.2 之间,而对应的消光系数和非线性系数也有了可调控区间,这大大地丰富了器件设计中材料选择的自由度,使其在薄膜光学、微纳平面光学和非线性集成光学等领域中具有巨大的吸引力。

在光学薄膜方面,通过制备氮化硅一维光子晶体结构,利用沿一维方向周期性排列的不同折射率介质,使得入射光被每个界面折反射进而发生干涉相消或相长,从而实现减反膜与滤波器的器件设计。在微纳平面光学方面,氮化硅被广泛应用于可见光超构表面和光栅耦合器中。超构表面是由许多亚波长微纳结构按照特定的功能需要以特定的人工排列组合成的一种微纳平面光学元件,具有超出自然界固有电磁性质的超常光学功能,能够在亚波长尺度下实现对光场振幅、相位、偏振、频率等特性的精准操控,从而任意调控整体波阵面的形状和性质,获得所需的光学元件性能。比如操控相位分布的、具有高分辨成像功能的氮化硅超构透镜,以及操控频谱特性的、具有像素级颜色调控的氮化硅超构表面等。而光栅耦合器是一种通过在片上光波导引入周期性或非周期刻槽形成的结构,利用光栅的布拉格衍射条件,其通常用于实现光纤和芯片中光波的耦合。该结构可解决波导模式与光纤模式的波矢匹配问题,实现两者的转换。在非线性集成光学方面,氮化硅材料在利用克尔效应上也具有良好的优势。光学克尔效应是指入射光本身的电场引起的材料折射率的非线性变化。这导致的折射率变化与入射光电场振幅的二次方以及材料本身的克尔系数成正比,进而导致自聚焦、自相位调制等非线性光学效应。利用氮化硅材料的折射率可调特性,通过调节制备参数可获得富硅氮化硅材料,其具有更大的非线性系数,同时保留了大带宽、低损耗和 CMOS 兼容特性,对其非线性特性进行调谐,可以达到与硅相接近的非线性克尔系数,从而能很好地实现较强非线性效应。总的来说,氮化硅光学薄膜与超构表面侧重于微纳光场的面外调控,而氮化硅光栅耦合器与非线性波导则侧重于面外与片上光场的耦合及片上微纳光场的调控。

本文将对基于氮化硅材料的光子器件与应用的研究进展进行综述。第一部分为引言；第二部分简要介绍了氮化硅材料的光学特性，并将从光学薄膜出发，论述氮化硅光学薄膜在带通滤波、减反以及选择性滤色等方面的光学应用；第三部分将综述氮化硅材料在超构透镜、结构色等光学超构表面的应用；第四部分将讲述氮化硅光栅耦合器的研究进展；第五部分将介绍富硅氮化硅材料在非线性领域的应用研究；最后是对全文的总结和展望。

2 氮化硅材料及其光学薄膜应用

2.1 氮化硅光学薄膜材料

氮化硅的折射率介于二氧化硅和硅之间，普通氮化硅的折射率在 2.0 左右，其具有较大的能带间隙(~5 eV)，没有双光子吸收和自由载流子效应，透明光学窗口覆盖可见、近红外通信波段到中红外波段(0.25 μm~8 μm)，在此窗口内，可实现非常低的传输损耗。如图 1(a)所示，相比于应用主要集中在近红外波段的Ⅲ-Ⅴ族半导体材料和绝缘体上硅(SOI)材料，绝缘体上氮化硅材料的应用波长范围更广，可覆盖从可见光到整个近红外光谱范围[11-14]。但由于二氧化硅在 4 μm 波长以上的强吸收特性限制了其工作波长的进一步扩大，而这一点在 SOI 平台上也同样存在，从而在近红外到中红外的波长范围主要由锗/硅材料填补。因此，在光学透明薄膜材料中，氮化硅是一种很好的候选材料，其可与 CMOS 制备工艺完全兼容，成本低，具有大规模生产的潜力，作为集成光子器件材料将具有非常大的优势，能应用在太阳能、光学成像、光通信等领域。

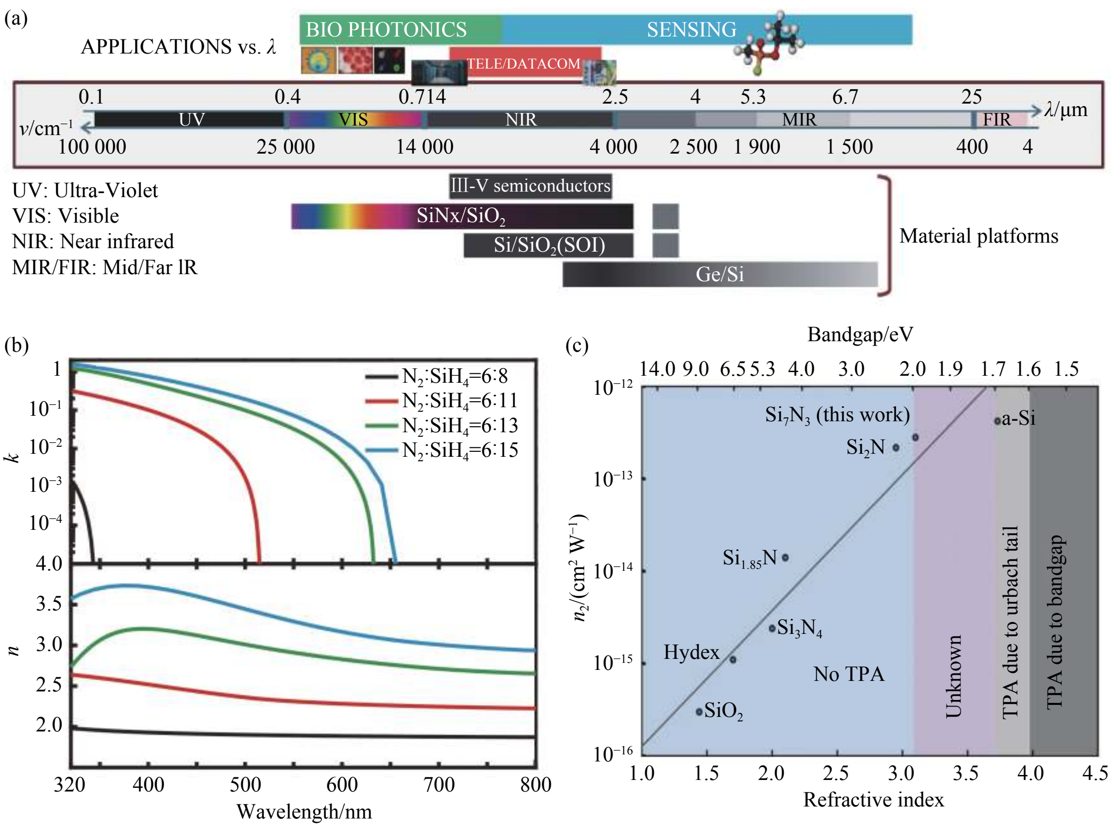


图 1 (a)不同材料体系在紫外到远红外的光谱工作波长范围以及对应波段的相关应用[11]；(b)我们实验室中 CVD 沉积过程中通入不同 N_2/SiH_4 的气体浓度比例获得的氮化硅薄膜的光学参数(n, k)值；(c)二氧化硅、氮化硅以及硅材料的带隙与其(线性及非线性)折射率关系图[14]

Fig. 1 (a) Working wavelengths of different material from UV to far-infrared and their related applications in corresponding wavebands[11]; (b) optical parameters (n, k) of silicon nitride films obtained by different N_2/SiH_4 gas concentration ratios during CVD by our lab; (c) diagram of the relationship between band gaps and (linear and nonlinear) refractive index of silicon dioxide, silicon nitride and silicon materials[14]

普通氮化硅薄膜可以通过一种成本低廉的薄膜沉积工艺获得,比如利用电感耦合等离子体化学气相沉积(ICP-CVD)方法,在 300 ℃ 下加入 SiH_4 和 N_2 作为反应气体,最终形成所需的氮化硅薄膜[12]。而在沉积过程中,还可以通过调节生长工艺参数对氮化硅的折射率进行调控,例如通过改变 SiH_4 和 N_2 的比率,可以改变氮化硅薄膜中硅原子的含量,如图 1(b)所示。当反应气体中 SiH_4 比例增加时,最终得到的氮化硅薄膜中硅原子的比例也将增加,氮化硅薄膜的折射率也随之增大,从而形成比普通氮化硅折射率要高的富硅氮化硅(Silicon-Rich Nitride, SRN)薄膜,而其他光学参数,如消光系数以及高阶非线性系数也会随着气体比例的改变而改变。又如,传统的物理气相沉积(PVD)方法是通过对纯氮化硅靶材进行磁控溅射制备氮化硅薄膜的,若将磁泵溅射的靶材换成硅,并在制备过程中通入 N_2 和 Ar 气体,从而通过调节 N_2/Ar 的气体浓度比例也可以获得不同折射率的富硅氮化硅材料[13]。总的来说,氮化硅薄膜材料折射率的可调控范围一般在 1.9~3.2 之间,这个范围不仅覆盖了二氧化钛和氮化镓材料的折射率,还提供了一个在普通氮化硅和硅之间调整的折射率,保证了较强的光局域效应和高密度器件集成潜力,并使得在设计上材料的选择范围更广。

此外,在非线性研究领域,氮化硅材料也具有良好的优势。根据 Kramers-Kronig 和 Millers 规则,随着折射率的增大,禁带能量减小,而非线性系数会增大。因此,氮化硅薄膜材料能提供一定范围的折射率,这也就意味着能实现一定范围内的非线性系数的调控。图 1(c)描绘了几种 CMOS 兼容材料的折射率、非线性系数和能带[14],可以看到,不同折射率的氮化硅材料对应的非线性系数也不一样,相比于二氧化硅,其可选择的非线性系数范围更广。而图中非晶硅材料位于较强双光子吸收效应的右边深色区域,因而往往用于制备小功率的非线性器件。氮化硅材料则基本都落在无双光子吸收效应的左边浅色区域,在实现大功率高增益非线性光学器件上具有巨大的潜力。以上这些光学特性使得氮化硅薄膜材料成为薄膜光学、超构平面光学、非线性集成光学等领域中一种极具吸引力的材料。

2.2　氮化硅光学薄膜应用

氮化硅的透明窗口覆盖了可见光波段,并且其折射率比二氧化硅要高,比硅要低,较为适中,常与其他折射率材料相结合形成带通滤波片等光学应用元件,也可以和氮氧化硅等介质薄膜层结合用于制备一维介质光子晶体结构,对入射光进行选择性反射,实现光学薄膜的高效多色化调控。此外,由于氮化硅薄膜能够饱和硅太阳能电池的表面悬挂键、钝化硅片的内部晶体缺陷与降低表面复合速率,因而也被用作高效太阳能电池的背反射层和钝化层等。

2016 年,南京大学的刘斌和张荣等人利用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术在蓝宝石衬底上成功地制备了二氧化硅/氮化硅多层膜[15],如图 2(a)所示,其样品表面粗糙度均方根小于 4.5 nm。他们用二氧化硅与氮化硅薄膜设计了分布式布拉格反射器结构的滤波片,通过精确控制二氧化硅和氮化硅层的宽度以及反射率,最终获得一系列通带宽度为 30 nm,中心通带范围为 310 nm~370 nm 的紫外带通滤波片。2017 年,中山大学洪瑞江课题组利用磁控溅射技术制备氢化氮化硅/氮化硅/氮氧化硅的多层减反射膜[16],能兼顾膜层抗反射能力和表面钝化特性。他们先利用氮化硅/氮氧化硅膜系实现了 4.03% 的最小反射率以及一个相对较低 (561 mV) 的开路电压。而将氢化氮化硅膜层作为钝化层引入到氮化硅/氮氧化硅多层膜系中,通过优化后,该多层膜系能保持较低的反射率 (5.43%),同时将开路电压提高到了 575 mV。同年,印度理工学院 Aldrin Antony 课题组通过改变 PECVD 过程中的气体混合比,得到了具有不同成分和光学性质的单层及多层的氮化硅和氮氧化硅薄膜(折射率为 1.53~3.29),并利用不同的氮化硅材料在硅基太阳能电池上制备了介质布拉格反射镜以及多层减反射膜[17]。该反射镜能在 800 nm~1 200 nm 波段内实现接近 100% 的反射率,而在 300 nm~1 100 nm 波段实验测得的减反射膜的加权平均反射率约为 0.64%。他们在第二年进一步利用富硅氮化硅和氮氧化硅薄膜形成的一维光子晶体结构,实现了 580 nm~1 200 nm 波长范围内具有 97.6% 反射率的背反射器[18],如图 2(b)所示,实验测得的电池吸收效率达 79.3%,短路电流密度仅为 14.77 mA/cm^2。而在 2019 年,

他们课题组还制备了由氮化硅和氮氧化硅组成的一维光子晶体[19]，能够对光进行选择性反射，并可集成到太阳能电池技术中形成彩色太阳能电池或组件，实现太阳能电池的多色化，如图 2(c)所示。与硅太阳电池的标准参考样品相比，他们所研制的彩色太阳能电池的相对功率转换效率为 70%~80%，保证了一定的太阳能利用效率，同时，在改善光伏发电系统的美观方面也具有潜在的意义。

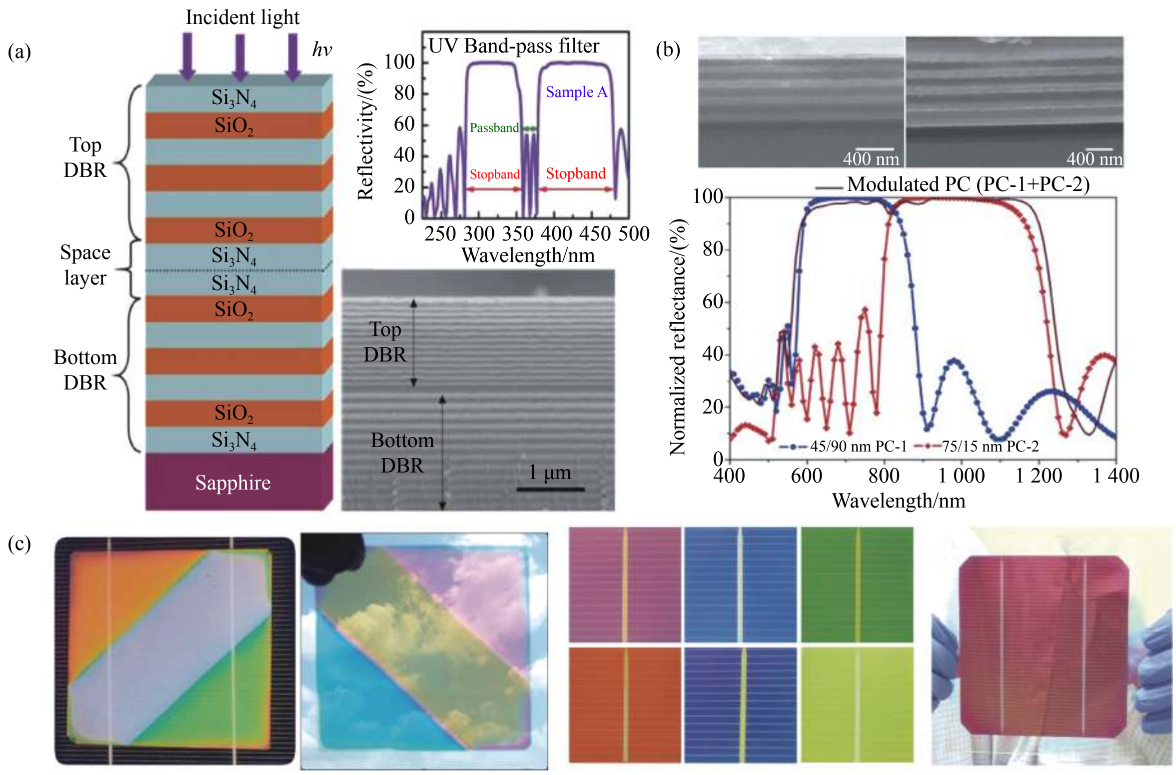


图 2 氮化硅均匀薄膜的光学应用。(a)带通滤波器结构图[15]；(b)氮化硅/氮化硅/氮氧化硅多层减反射膜反射光谱及结构示意图[18]；(c)氮化硅/氮氧化硅基彩色太阳能电池薄膜[19]

Fig. 2 The optical application of silicon nitride homogeneous films. (a) Diagram of band-pass filter structure[15]; (b) reflection spectrum and structure diagram of silicon nitride / silicon nitride / silicon oxynitride multilayer antireflection film[18]; (c) silicon nitride / silicon oxynitride films in the application of colored solar cell[19]

3 氮化硅超构表面

近年来，随着光学器件的集成化与微型化需求越来越高，具有高自由度设计、高精度调控和超薄超轻特性的超构表面技术受到越来越多的关注，而氮化硅也因其光学波段高透和 CMOS 兼容的材料特性被广泛应用于可见光超构表面中。本节主要讲述氮化硅超构表面在超构透镜[12-13, 20-36]、颜色调控[37-42] 以及其它[43-55] 方面的发展。

3.1 氮化硅超构透镜

氮化硅超构透镜的研究始于单色光的消球差设计，实现接近衍射极限的聚焦光斑。2016 年，美国华盛顿大学的 Arka Majumdar 研究组利用低折射率氮化硅材料设计并制备了多个微尺寸的偏振不敏感超构透镜[20]，最大数值孔径为 0.75，在 633 nm 可见光下最高聚焦效率达 40%，并实现了接近衍射极限的聚焦光斑，如图 3(a)所示。他们还展示了涡旋光生成并聚焦的超构透镜设计，实验上观察到了甜甜圈形状的聚焦光斑。随后在 2018 年，本课题组将氮化硅超构透镜的数值孔径提升到了 0.98，并利用电子束曝光系统制备出了首个厘米口径尺寸的氮化硅超构透镜样品[12]，如图 3(b)所示，该工作在波长 633 nm 下获得了接近衍射极限的亚波长聚焦光斑，并在实验上展示出了高分辨的广角成像潜力。同年，西安光学精密机械研究所赵卫等人利用圆柱型氮化硅结构，仿真实现了数值孔径为 0.58 的非偏振超构透镜[21]，

632 nm 工作波长下透过率可以达到 85%。韩国科学技术院的 Ki-Hun Jeong 等人则在实验上制备了由方型氮化硅纳米柱组成的超构透镜,展示了不同可见光波长下的成像效果[22]。2019 年,密歇根大学易亚沙课题组利用简单 PECVD 与 PVD 的工艺,生长了折射率不同的富硅氮化硅薄膜[13]。他们使用折射率为 2.74、厚度为 600 nm 的富硅氮化硅薄膜材料,在可见光波段 685 nm 处设计并实现了聚焦效率为 42% 的亚波长光栅超构透镜。他们还在同一年实现了数值孔径为 0.9 且具有线性偏振器功能的富硅氮化硅超构透镜[23]。超构透镜厚 600 nm,周期为 280 nm,最小线宽为 48 nm,工作波长为 685 nm。当入射光为 E_z 时聚焦效率为 49.8%,而对于正交偏振的 H_z 入射光,聚焦效果会得到抑制,相同焦平面处测得的效率仅为 14.5%。

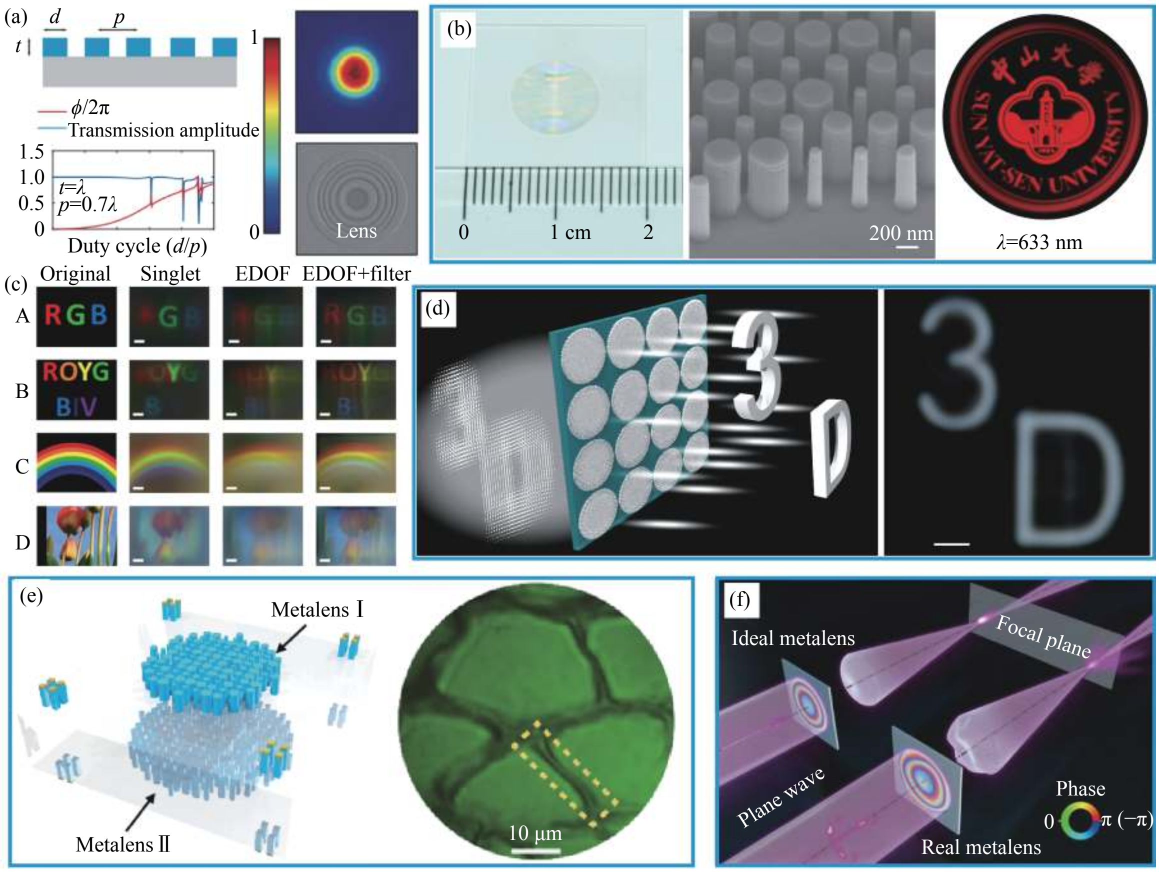


图 3　氮化硅超构透镜。(a)消球差氮化硅超构透镜实现接近衍射极限的聚焦性能[20];(b)高数值孔径厘米口径氮化硅超构透镜及其成像效果[12];(c)氮化硅超构透镜实现计算消色差成像[24];(d)氮化硅超构透镜阵列及其宽带消色差集成成像应用[26];(e)基于级联超构透镜的微型氮化硅超构物镜[28];(f)超构透镜相位测量[29]

Fig. 3　Silicon nitride metalenses. (a) Spherical aberration free silicon nitride metalens achieves the nearly diffraction-limited focusing[20]; (b) high-NA centimeter-aperture silicon nitride metalens and its imaging performance[12]; (c) silicon nitride metalens for computational achromatic imaging[24]; (d) array of silicon nitride metalens for broadband achromatic integral imaging[26]; (e) microscope silicon nitride meta-objective based on cascaded metalenses[28]; (f) phase characterization of metalens[29]

上述单波长设计的氮化硅超构透镜能在所设计波长下具有接近衍射极限的聚焦光斑,能实现很好的消球差效果,但在其它波长下会具有一定色差,其色差特性类似于普通衍射透镜,即焦距随波长的增大而减少。近年来,研究人员利用氮化硅超构透镜在计算消色差和宽带消色差方面都有了突破。2018 年,Shane Colburn 等人实现了数值孔径为 0.45 的单个氮化硅超构透镜的计算消色差成像[24]。他们通过在理想透镜相位分布上额外添加三次相位分布,增大了氮化硅超构透镜在不

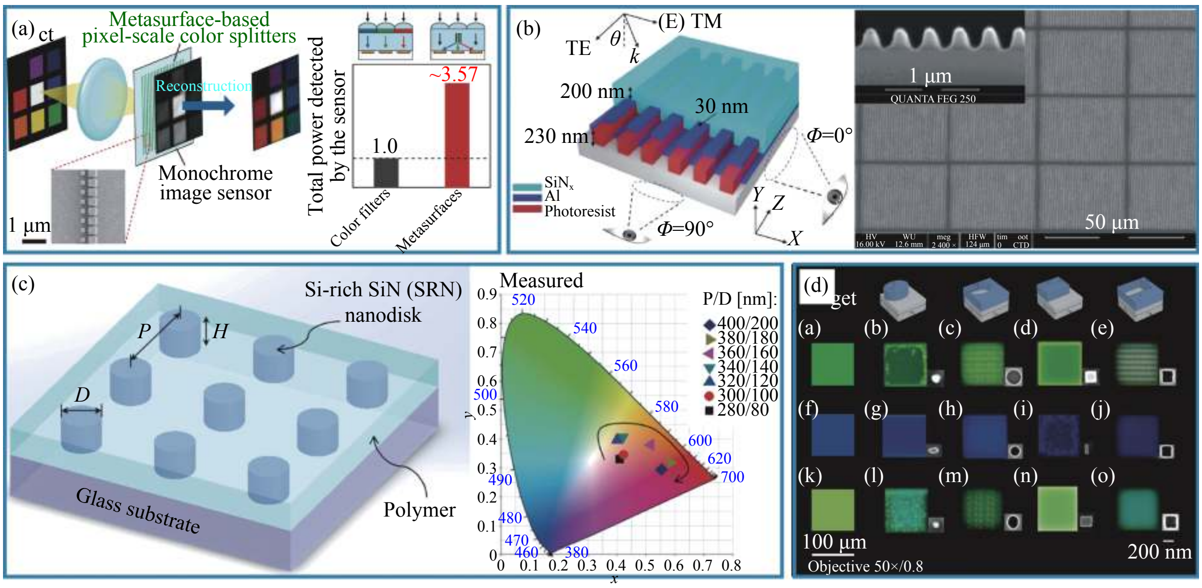
同波长上的焦深，使其在焦平面上获得了谱不变的点扩散函数，通过后期计算成像滤波处理，在实验上展示了彩色的计算成像效果，如图 3(c)所示，他们在第二年还实现了计算消色差和变焦成像的结合[25]。2019 年，本课题组提出了基于等效折射率的宽带消色差方法，设计了偏振不敏感的各种氮化硅纳米柱结构，在实验上实现了可见光波段 430 nm~780 nm 的宽带消色差超构透镜[26]，并制备了 60×60 的超构透镜阵列，并与北京航空航天大学王琼华课题组合作率先在白光下完成了三维非相干集成成像的消色差光学再现效果，如图 3(d)所示。除了对超构透镜的色差进行校正外，通过纳米结构的设计还能灵活地定制超构透镜的色散特性。同年，我们利用折射率为 2.4 的富硅氮化硅材料，在可见光波段设计了双波长色散调控的超构透镜[27]。通过设计 1 000 nm 厚的多种微纳结构单元，实现了 440 nm 和 720 nm 波长下的相位解耦与 2π 全覆盖，从而可以实现任意色散的双波长超构透镜。分别设计了 3 种双波长富硅氮化硅超构透镜，分别实现了零轴向色散、正轴向色散和负轴向色散的性能。这一研究结果有望为复杂荧光成像技术提供双波长的功能器件。此外，为了尽量满足宽视场高分辨率的内窥成像需求，我们进一步提出了基于级联超构透镜的微型超构物镜[28]。超构物镜通过在同一衬底的两面级联两片直径分别为 400 μm 和 180 μm的超构透镜，在 125 μm 全视场范围内消单色像差，实现了 775 nm 的亚微米级横向分辨率，结合光纤束显微内窥镜系统，展示了生物组织单细胞轮廓的衍射极限成像，如图 3(e)所示。而针对微型超构透镜的光学性能表征测试，2021 年，复旦大学石磊和资剑课题组、香港理工大学蔡定平团队以及中山大学董建文团队三方合作，提出了一套干涉成像相位测量系统，通过一次拍照获得超构透镜的相位分布[29]。该系统可以用于测量尺寸仅为几十微米的超构透镜，相位测量精度高达0.05 rad。结合光场传播计算方法，该系统不仅可以获得光场强度分布，而且能够定量分析超构透镜的波像差，评价超构透镜的光学性能，结果如图 3(f)所示。

除了像差设计外，研究人员在氮化硅超构透镜的焦深设计方面也提出了相关的方法。2020 年，Elyas Bayati 等人提出了基于伴随优化的逆向设计方法设计扩展焦深的一维氮化硅超构透镜[30]，在 625 nm 波长下实现了焦深为 44 μm 的扩展焦深超构透镜，与普通超构透镜相比，其焦深增大了一倍，且聚焦效率和普通超构透镜差不多。同年，Luocheng Huang 等人提出了 3 种扩展焦深的超构透镜设计[31]，其相位分布分别满足对数非球面、移位圆锥以及根立方(square cubic)的相位分布公式。相比于单纯的立方相位分布，这 3 种相位分布都具有轴对称的特征，且能实现较长的焦深，能缓解立方相位设计中点扩散函数的非对称缺陷问题。在变焦设计方面，Arka Majumdar 研究组利用自由曲面光学设计方法，将两个立方相位分布的氮化硅超构表面，组合成阿尔瓦雷斯超构透镜系统[32, 33]。当两个超构表面横向相对位置发生变化时，超构透镜系统的焦距也随之产生非线性变化，从而可以通过移动两个超构表面的相对位置，实现动态的调焦功能。他们实验上制备了 1 cm 口径的阿尔瓦雷斯氮化硅超构透镜，在 1 550 nm 波长下聚焦效率为 57%，其调焦范围能达到 6 cm。2020 年，Zheyi Han 等人将阿尔瓦雷斯超构透镜和微机电系统(MEMS)结合[34]，在 1 550 nm 波长下利用 MEMS 驱动氮化硅超构表面横向移动，在 6.3 μm 横向位移范围内能实现 68 μm 的焦距可调节。

此外，日本 NTT 设备技术实验室的 Masashi Miyata 等人在 2020 年结合复眼光学设计，利用氮化硅材料在 520 nm 波长下设计了复眼的超构透镜[35]，实验上展示了高灵敏度、超薄的偏振成像效果。相比于传统的焦平面划分(Division-of-Focal-Plane, DoFP)系统，他们提出的复眼超构透镜系统能增加 2 倍探测光数目，且系统厚度缩小到普通偏振相机的 1/10，他们的工作将氮化硅超构透镜扩展到了偏振成像领域。同一年，上海科技大学的 Saima Kanwal 等人利用氮化硅材料在紫外波段上设计了高效的偏振超构透镜[36]，仿真结果显示：该超构透镜在 250 nm~400 nm 波段都具有良好的聚焦性能，且最高聚焦效率能达到 77%。该工作展示出了氮化硅材料应用于紫外超构透镜并实现高效率的可能性。

3.2　氮化硅颜色调控超构表面

在颜色调控方面, 2019 年, 日本 NTT 公司的 Toshikazu Hashimoto 研究组利用氮化硅超构表面展示了像素级的 RGB 分色元件[37], 如图 4(a)所示, 通过设计氮化硅纳米柱结构, 将 430 nm、520 nm 和 635 nm 的光分别衍射到−1 级、0 级和 1 级上, 衍射效率在 40%~50% 之间, 从而实现 RGB 颜色在空间上的分离。他们展示了 1.43 μm×1.43 μm 的最小像素分辨率, 相比于传统滤色片, 实验上探测光强增强了 2.92 倍, 将有助于提高彩色成像的灵敏度。此外, CMOS 兼容的氮化硅分色元件也有利于和 CMOS 图像传感器集成。同年, 苏州大学陈林森研究组设计并制备了 3 cm×3 cm 大小的超构表面滤色片[38], 该超构表面滤色片由介质光栅、铝纳米贴片和氮化硅层组合而成, 如图 4(b)所示。通过该滤色片, 在相同入射角的垂直平面上能观察到不同的透射颜色, 其透射效率能达到 60%, 而透射颜色可以通过改变光栅的周期来调控。该工作在彩色印刷和防伪上具有潜在的应用。韩国光云大学的 Chul-Soon Park 等人利用富硅氮化硅折射率较高 (n~3)、消光系数较小的特点设计并制备了一套高效的超构表面结构色滤波片[39], 如图 4(c)所示。该超构表面由嵌入聚合物层的 200 nm 厚富硅氮化硅微纳圆柱阵列组成, 利用富硅氮化硅圆柱中电偶极子(ED)和磁偶极子(MD)共振, 可以实现适当的光谱滤波特性。在可见光波段下, 人工彩色滤光片在透射和反射模式下都能产生不同的颜色。在非共振区有高约 90% 的透过率, 而反射模式的效率约为 60%。通过调整纳米结构的周期、直径和高度等结构参数, 可以实现多种颜色的共振。而改变纳米结构周围的聚合物, 共振的光谱位置也会得到适当的调整。法国特鲁瓦技术大学的 Alma K. Gonzalez-Alcalde 等人采用基于元模型的优化方法来设计 300 nm 厚的富硅氮化硅结构色超构表面[40], 如图 4(d)所示。该算法将启发式优化和神经网络相结合, 检索出用于再现指定颜色的单元超构表面结构的最佳几何参数, 从而形成所需超构表面, 并在实验上验证了海蓝、颜料绿、埃及蓝的结构色。该成果在低计算成本的彩色复制上具有潜在意义。2020 年, 中国台湾交通大学的 Kuo-Ping Chen 研究组制备了氮化硅超构表面进行结构色调控[41], 并展示了不同颜色字符的彩色效果, 如图 4(e)所示。在相对较短的波长下利用氮化硅纳米柱的瑞利异常来抑制高阶的 Mie 共振, 从而实现逼真的颜色像素, RGB 像素反射率在 40%~70% 之间, 其像素大小仅有 2.5 μm×2.5 μm, 对应的屏幕分辨率约为 10160 dpi。此外, 西安光学精密机械研究所 Yunfan Hong 等人设计了一维的氮化硅超构表面来实现高饱和度的结构色[42], 如图 4(f)所示, 通过优化氮化硅超构表面的结构参数, 在仿真上能实现 90% 的高反射率峰值和 10 nm 的窄带半高宽, 且其偏振敏感性使得在不同正交偏振下观察到的颜色也会不一样。



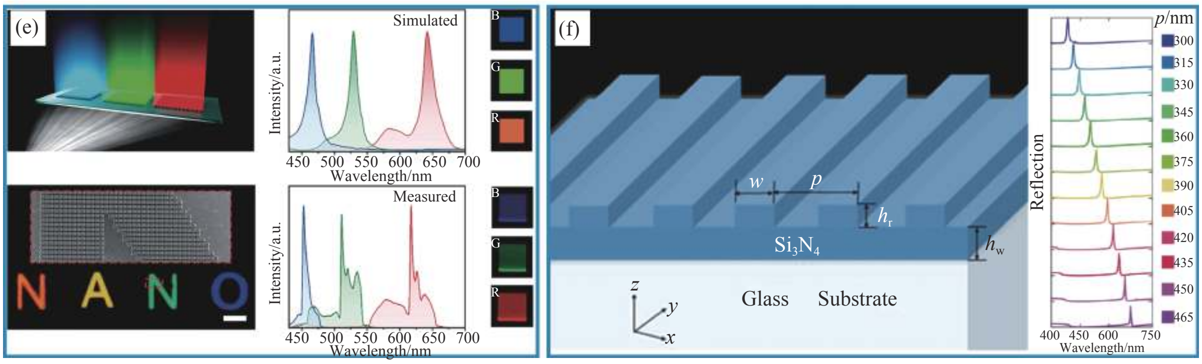


图 4 氮化硅颜色调控超构表面。(a)像素级 RGB 分色氮化硅超构表面[37];(b)氮化硅覆盖层的超构表面滤色片[38];(c)富硅氮化硅超构表面结构色测量光谱在 CIE 1931 色度图上的对应[39];(d)暗场下富硅氮化硅超构表面的反射颜色图[40];(e)像素级氮化硅超构表面实现结构色调控[41];(f)偏振敏感的一维氮化硅超构表面实现结构色调控[42]

Fig. 4 Silicon nitride metasurfaces for color control. (a) Pixel-level RGB color separation silicon nitride metsurface[37]; (b) silicon nitride coating metasurface for color filter[38]; (c) the corresponding measurement spectrum of silicon-rich nitride metasurface on CIE 1931 chromaticity diagram[39]; (d) reflection colors of silicon-rich nitride metasurfaces in dark field[40]; (e) pixel-level silicon nitride metasurface for structural color controlling[41]; (f) one-dimensional polarization-sensitive silicon nitride metasurface for structural color controlling[42]

3.3 其它氮化硅超构表面

除了超构透镜和颜色调控超构表面外,氮化硅超构表面在宽带吸收、波前整型、特殊光束生成等多个方面都有涉及。2016 年,土耳其科学家在长波红外(LWIR)区域设计了大带宽和高吸收的氮化硅超构表面吸收元件[43]。基于铝-氮化硅-铝的 MIM 结构如图 5(a)所示,在正入射下,所设计的吸收元件在 8.07 μm~11.97 μm 波段内具有 90% 以上的吸收效率,在 7.9 μm~14 μm 之间吸收率则超过 80%。2018 年,美国加州理工学院 Mooseok Jang 等人提出了无序设计的氮化硅超构表面[44],如图 5(b)所示,其具有较大的光存储效应范围等独特的波前整形特征。利用该超构表面,他们在实验上展示了数值孔径大于 0.5 的光学聚焦,以及在 8 mm 视场角内约 2.2×10^8 个可寻点的荧光成像。同年,加拿大滑铁卢大学的 Jeremy Flannery 等人通过在空心光子晶体光纤两端面贴上一对氮化硅超构表面[45],如图 5(c)所示,实现了光纤集成的法布里-珀罗谐振腔,实验上测得其精细度约为 11,Q 因子约为 4.5×10^5。该工作促进了氮化硅超构表面向光纤集成化、微型化方向发展,有望应用于光纤激光器、光谱仪等器件领域。2019 年,英国南安普敦大学的 Artemios Karvounis 等人提出了由二硫化钼、氧化钼和氮化硅组成的亚波长纳米线阵列超构表面[46],如图 5(d)所示,能够通过机械变形实现颜色改变,在 654 nm 波长下相对透过率变化达到 197%,且在快速弯曲形变时在 678 nm 波长下透过率能达到 45%。同年,厦门大学陈理想和中山大学余思远研究组共同提出了用于片上多通道轨道角动量(OAM)生成和探测的氮化硅超构表面[47],如图 5(e)所示。他们制备了 0.5 mm×0.5 mm 的 OAM 超构表面,能够同时生成拓扑荷从−3 到+3 的 OAM 光束,总转换效率达 82%,该超构表面还能反向应用于探测光束的 OAM 态,其串扰小于−18 dB。此外,在特殊光束整形上,余思远课题组利用富硅氮化硅在 720 nm~2 500 nm 范围内具有高折射率和低损耗的特性,在 2019 年设计了晶格常数为 1 000 nm、厚度为 1 200 nm 的高效偏振敏感的富硅氮化硅超构表面[48]。它能够在 1 550 nm 波长处产生 2π 相位控制的螺旋光束,并且螺旋光束的主瓣沿螺旋轨迹运动。而 2020 年,易亚沙课题组则通过将焦点塑造成设计灵活的图案,提出了一种新的点阵聚焦超构表面[49],并将其推广到人工聚焦图形中。他们利用 600 nm 厚的富硅氮化硅材料制备并表征了具有“M”形焦点的超构表面,在 685 nm 入射光照射下,在图案不同位置的聚焦 NA 值在 0.6 到 0.8 变化。同一年,美国华盛顿大学 Yueyang Chen 等人通过将原子级薄的单层二硒化钨(WSe_2)集成到氮化硅超构表面中[50],如图 5(f)所示,形成一个二维的激子−极化子系统,在该系统的反射谱和光致发光光谱中能观测到极化色散的反交叉特征,以及 18 meV 的 Rabi 劈裂。除了上述类型的超构表面外,近年来科学家在特殊光束

生成、光致发光、非线性效应等方面都对氮化硅超构表面展开研究,并在国际会议上进行了相关报道[51-55]。可以看到,氮化硅超构表面的相关研究在不断发展和深入,未来也将涉及到更多更广的应用领域。

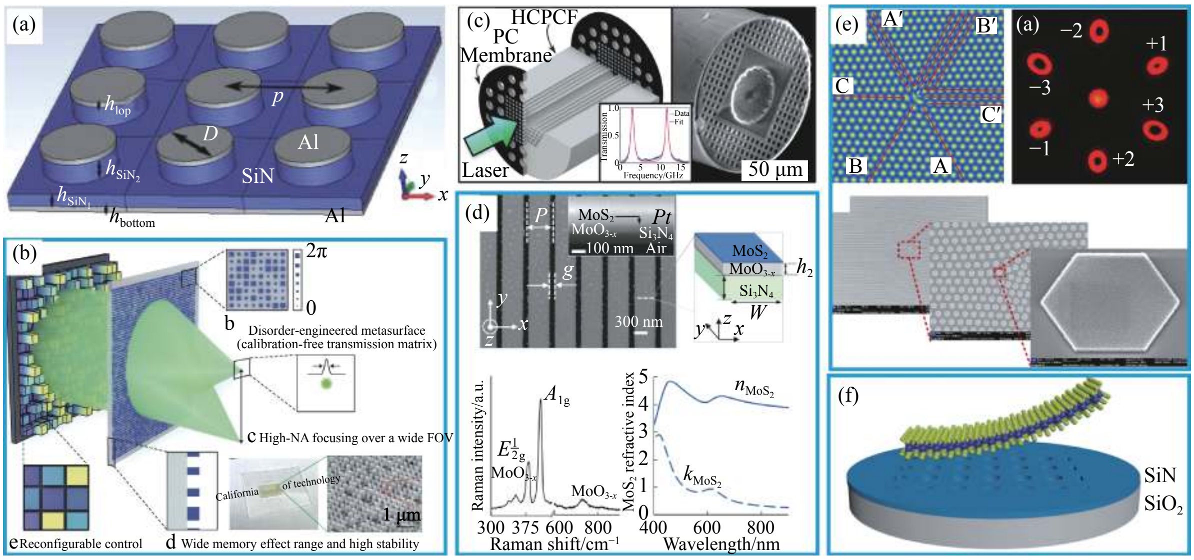


图 5　其它氮化硅超构表面。(a)长波红外氮化硅超构表面吸收器[43];(b)基于无序设计的氮化硅超构表面实现波前整形[44];(c)光纤端面氮化硅超构表面[45];(d)氮化硅超构表面实现机械变色[46];(e)多通道 OAM 氮化硅超构表面[47];(f)单层二硒化钨集成的氮化硅超构表面[50]

Fig. 5　Other silicon nitride metasurfaces. (a) Silicon nitride metasurface absorber working on long-wave infrared[43]; (b) silicon nitride metasurface based on disordered design for wavefront shaping[44]; (c) silicon nitride metasurface at fiber end-face[45]; (d) mechanochromic reconfigurable silicon nitride metasurface[46]; (e) multi-channel OAM silicon nitride metasurface[47]; (f) silicon nitride metasurface integrated with single-layer WSe_2[50]

4　氮化硅光栅耦合器

近年来,光子集成电路(PIC)已经逐渐发展为一项成熟且强大的技术,其在信息传输和处理领域有着难以替代的优势,因此被广泛应用于光通信、光学传感及量子信息处理等领域。PIC 中的一个关键问题是实现光纤和亚微米波导芯片之间的高效耦合。其中,由于光栅耦合器具有空间位置灵活、制作工艺较为简单等优点,在解决光纤与波导间的耦合问题上具有重要作用。光栅耦合器是一种通过在片上光波导引入周期性(或非周期)刻槽形成的结构,利用光栅的布拉格衍射,实现光纤和芯片中光波的耦合。当满足相位匹配条件时,来自外部光纤的入射光可以耦合到片上波导中进行传输;反之,来自波导的入射光也可以通过光栅耦合器耦合出去,进入外部光纤中。2020 年初,北京大学彭超课题组与其合作者从拓扑光子学视角提出了一种单层硅光栅上不依靠反射镜而实现定向辐射的方法,有望显著提高向外辐射效率以及降低片上光端口的插入损耗[56]。但光栅耦合器最重要的性能指标除了耦合效率,还有耦合带宽(通常以耦合效率的 1-dB 点或 3-dB 点为标准),而传统的绝缘体上硅(SOI)光栅耦合器因材料限制通常面临着耦合带宽较低的问题。显著增加 1-dB 点耦合带宽的方法是减小光栅的有效折射率,氮化硅作为一种合适的材料,既具有硅基材料的 CMOS 兼容性,保持低成本与合理的集成度,也能以较低的等效折射率实现最佳的光栅耦合强度。此外,由于氮化硅与二氧化硅的折射率对比度较低,可以使光子器件对表面粗糙度的敏感性降低,并且在制造过程中对尺寸偏差的容忍度更高。因此,利用氮化硅材料制备的光栅耦合器有希望实现更好的相位误差容忍度,更低的插入损耗和更好的热稳定性,促进 PIC 耦合问题的解决,在光芯片中具有潜在的应用价值。下面将分别针对单层氮化硅光栅耦合器[57-69],反射镜结合的光栅耦合器[70-75]和双层光栅耦合器[76-78]展开综述。

4.1　单层光栅耦合器

在氮化硅光栅耦合器发展前期，研究的关注点主要集中在均匀或变迹的单层光栅耦合器结构[57-69]。2008 年，法国科学家 Laurent Vivien 等人较早提出了基于氮化硅波导的均匀光栅耦合器[57]，在 1310 nm 波长下的耦合效率超过 60%，3-dB 点耦合带宽为 50 nm。当波长从 1310 nm 增加到 1450 nm 时，其耦合效率逐渐降低，但在 1450 nm 处仍保持 20% 以上。2010 年，美国贝尔实验室 Christopher R. Doerr 等人的工作将 1-dB 点耦合带宽提升至 67 nm，且在 1565 nm 处的峰值耦合效率为−4.2 dB[58]。该工作阐明了光栅等效折射率与带宽的关系，认为氮化硅光栅耦合器相比 SOI 硅光栅耦合器具有更大的耦合带宽。2013 年，德国科学家 Sebastian Romero-García 等人提出了可见光波段下与自由空间高斯光束相耦合的氮化硅光栅耦合器[59]，中心波长为 660 nm，在 TE 偏振下耦合效率高于 38%。2014 年，新加坡 A*STAR 的 Huijuan Zhang 等人利用深紫外光刻技术制备了高效的氮化硅光栅耦合器[60]，如图 6(a)、6(b)所示，实验测得的在 1480 nm 处峰值耦合效率为−5.1 dB，1-dB 点耦合带宽为 60 nm。2016 年，华中科技大学夏金松等人提出了 700 nm 厚的氮化硅条形波导光栅耦合器[61]。通过聚焦光栅结构和反拉锥波导相结合，将占位面积减小至 70.2 μm×19.7 μm。如图 6(c)、6(d)所示，在 TE 偏振下实验上获得了峰值耦合效率为−3.7 dB，1-dB 点耦合带宽为 54 nm 的光栅耦合器。斯洛伐克兹利纳大学 Jan Litvik研究组利用傅立叶本征模展开法和时域有限差分法，设计了宽带的氮化硅光栅耦合器[62]。在 1550 nm波长处具有–2.6635 dB(54.16%)的峰值耦合效率，其 1-dB 点耦合带宽达 80 nm。同年，浙江大学何建军研究组提出了一种自成像的单层氮化硅变迹光栅耦合器[63]，输出光纤放置在距离光栅耦合器特定距离处(约 112 μm)，在 1550 nm 波长附近，仿真得到了 86%(−0.66 dB)的耦合效率，3-dB 点耦合带宽为 40 nm。通过对光栅耦合器振幅和相位的变迹来设计自成像光栅的传递函数，从而产生与光纤模式相匹配的像场。该研究组还在 2018 年对设计的光栅结构进行了实验演示，获得了−1.5 dB 的耦合效率，其 3-dB 点耦合带宽为 60 nm[64]。

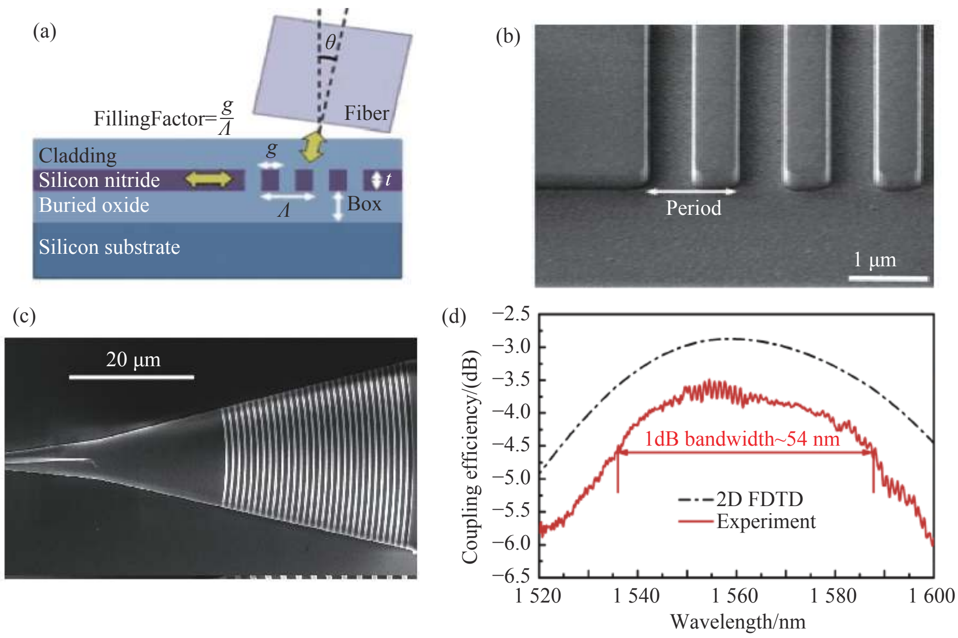


图 6　氮化硅单层光栅耦合器结构。(a)基于深紫外光刻制造的光栅耦合器示意图[60]；(b)光栅耦合器部分区域放大的 SEM 图[60]；(c)聚焦光栅耦合器结构的 SEM 图[61]；(d)在不考虑拉锥波导损耗的情况下测得的氮化硅光栅耦合器的耦合效率(实线)和模拟的耦合效率(虚线)[61]

Fig. 6　Silicon nitride single-layer grating couplers. (a) Schematic diagram of grating coupler manufactured based on deep ultraviolet lithography[60]; (b) enlarged SEM image of part of grating coupler[60]; (c) SEM image of focusing grating coupler structure[61]; (d) coupling efficiency (solid line) and simulated coupling efficiency (dashed line) of a silicon nitride grating coupler measured without considering the loss of the tapered waveguide[61]

4.2　反射镜结合的光栅耦合器

在光栅耦合器实际耦合过程中, 由于光栅的衍射特性, 会有相当一部分光泄露到衬底当中。这限制了耦合效率的进一步提高。因此, 为了减少向衬底泄露的光, 研究人员提出了在光栅底部设计充当反射镜功能的结构, 从而提高器件的整体耦合效率[70-75]。2014 年, 新加坡 A*STAR 的 Huijuan Zhang 等人提出了一种分布式布拉格反射器(DBR)结合的高效氮化硅光栅耦合器[70]。采用由高折射率材料非晶硅和低折射率材料二氧化硅薄膜组成的 DBR 结构作为底部反射镜, 通过将向下的衍射光反射上去来提高耦合效率。在 1 490 nm 处获得的峰值耦合效率约为−2.5 dB, 1-dB 点耦合带宽为 53 nm。2015 年, 华中科技大学张新亮研究组也从理论上提出了具有高效率的反射镜结合的氮化硅光栅耦合器[71], 如图 7(a)、7(b)所示, 他们利用具有高反射率的底部硅光栅反射器代替分布式布拉格反射器。硅光栅反射器是基于 220 nm 顶部硅层的标准 SOI 晶圆设计的, 通过适当地调整硅光栅的沟槽宽度和周期长度, 可以获得超过 90% 的高反射率。氮化硅光栅层与硅光栅层之间存在一定厚度的二氧化硅。当两种光栅之间距离适当时, 使用均匀的光栅耦合器结构, 理论上可获得−1.47 dB 的低耦合损耗。而通过对氮化硅光栅耦合器进行变迹设计, 理论上则可预测到−0.88 dB 的更低损耗。2017 年, 日本九州大学 Shiyoshi Yokoyama 研究组实验表征了一种利用四分之一波长厚度的氮化硅和二氧化硅交替堆叠而成作为多层介质反射器的高效氮化硅光栅耦合器[72]。实验测得在 1.55 μm 处峰值耦合效率为−4.5 dB, 3-dB 点耦合带宽为 68.0 nm。2018 年, 天津工业大学张赞允课题组则采用变迹光栅结构, 设计了一种基于氮化硅材料的光栅耦合器, 实现了对入射光的垂直耦合[73]。在衬底带有金属反射镜的情况下, 在 1 550 nm 波长处单向传输的耦合效率达到了 79.5%, 相比于不引入金属反射镜时, 耦合效率提高了 21.7%。2019 年, 印度科学研究所 Siddharth Nambiar 等人在 PECVD 平台上制备了具有底部布拉格反射器的高效氮化硅光栅耦合器[74]。如图 7(c)、7(d)所示, 当氮化硅厚度为 500 nm 时, 在 1 573 nm 的波长处峰值耦合效率为−2.29 dB, 1-dB 点耦合带宽为 49 nm; 而氮化硅厚度降低到 400 nm 时, 在 1 576 nm 处耦合器的耦合效率为−2.58 dB, 1-dB 点耦合带宽达 52 nm。

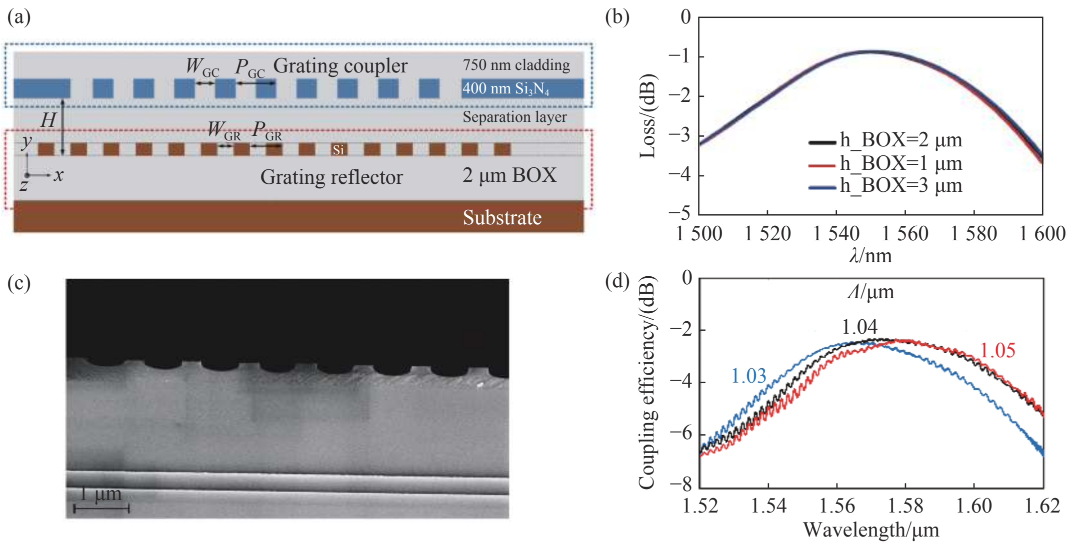


图 7　与底部反射镜相结合的氮化硅光栅耦合器。(a)以硅反射光栅作为底部反射镜的氮化硅光栅耦合器示意图[71]; (b)具有不同掩埋氧化层厚度的变迹氮化硅光栅耦合器的耦合效率[71]; (c)基于 PECVD 平台制造的 DBR 反射镜式部分刻蚀光栅耦合器 SEM 图[74]; (d)光纤倾斜角为 8.5°时不同光栅周期对耦合效率的影响[74]

Fig. 7　Silicon nitride grating couplers combined with bottom mirror. (a) Schematic diagram of a silicon nitride grating coupler with a silicon reflection grating as the bottom mirror[71]; (b) coupling efficiency of apodized silicon nitride grating couplers with different buried oxide thicknesses[71]; (c) SEM image of DBR mirror type partially etched grating coupler manufactured on PECVD platform[74]; (d) the influence of different grating periods on the coupling efficiency when the fiber tilt angle is 8.5°[74]

4.3 双层光栅耦合器

除了结合反射镜式结构的方法外，研究人员还提出了双层光栅耦合器结构[76-78]，通过增加光栅耦合器设计的自由度，从而达到提高耦合效率和增大耦合带宽的效果。2014 年，加拿大多伦多大学的 Wesley D. Sacher 研究组提出并演示了一个双层光栅耦合器[76]，该光栅耦合器由 65 nm 厚的硅光栅层和 400 nm 厚的氮化硅光栅层组成，两光栅层之间有 135 nm 厚度的二氧化硅间隔层。实验上测得该双层光栅耦合器在 1 536 nm 处的峰值耦合效率为−1.3 dB，其 1-dB 点耦合带宽为 80 nm。通过调节氮化硅和硅光栅之间的偏移量，光栅耦合器的方向性可提高到 81%。此外，他们还展示了使用双层光栅耦合器和热调谐硅微环谐振器结合的可调多路复用器/分解器。2017 年，中山大学的余思远研究组提出了一种新颖的双层变迹光栅耦合器[77]，如图 8(a)、(b)所示。该光栅耦合器由 600 nm 厚的氮化硅层、220 nm 厚的硅层以及 1.6 μm 的二氧化硅间隔层组成。他们先对均匀光栅进行数值优化设计，再通过遗传算法进一步优化实现变迹设计。最终获得的双层变迹光栅在实验上 1 567 nm 波长附近获得了−2.5 dB 的耦合效率，其 1-dB 点耦合带宽为 65 nm。2018 年，美国纽约州立大学的 Eng Wen Ong 等人也提出了多个双层氮化硅光栅耦合器[78]，如图 8(c)、8(d)所示，其中氮化硅层厚度为 220 nm。在 C 波段 TE 偏振下，光栅耦合器理论上耦合效率能达到−2.28 dB，1-dB 点耦合带宽为 57.7 nm。在均匀的椭圆形布局设计下，峰值耦合效率为−2.61 dB，1-dB 点耦合带宽为 50.7 nm。而对于变迹椭圆形布局设计，实验测得的耦合效率达到−2.56 dB，1-dB 点耦合带宽为 46.9 nm。

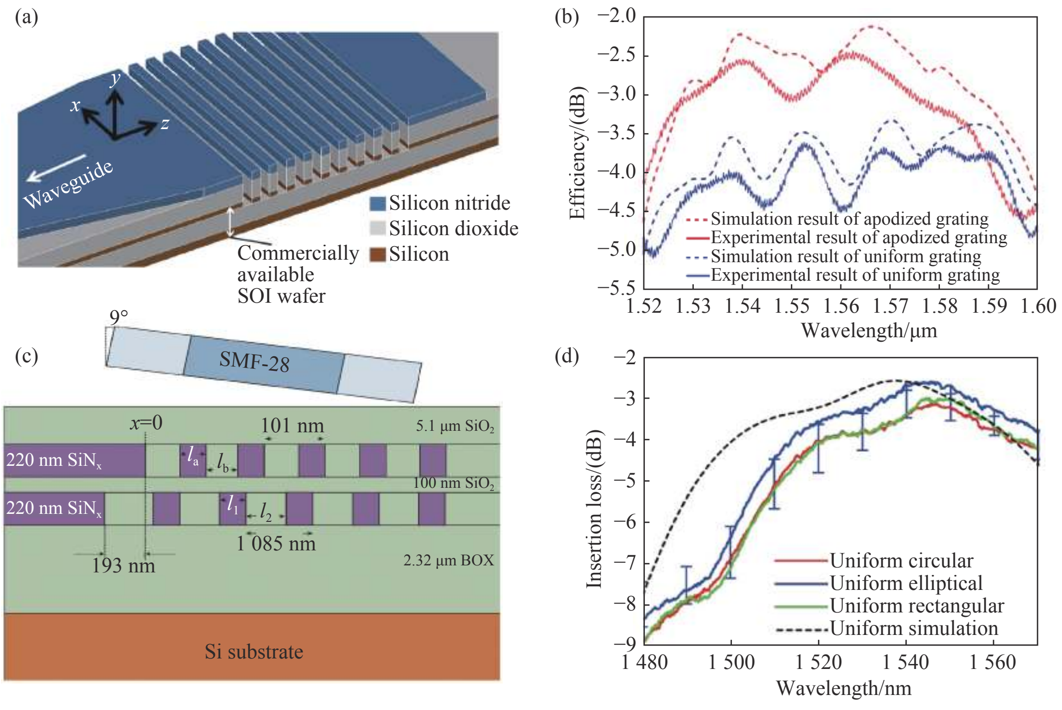


图 8 双层光栅耦合器。(a)由氮化硅光栅和硅光栅组成的双层光栅耦合器示意图[77]；(b)均匀和变迹光栅耦合器模拟与实验测得的耦合效率曲线[77]；(c)双层氮化硅光栅耦合器结构示意图[78]；(d)对于具有不同横向布局(圆形，椭圆形和矩形)的光栅耦合器模拟和测量的耦合效率曲线。蓝色误差线表示椭圆布局的平均插入损耗的 1 个标准偏差[78]

Fig. 8 Double-layer grating couplers. (a) Schematic diagram of double-layer grating coupler composed of silicon nitride grating and silicon grating[77]; (b) coupling efficiency curves of uniform and apodized grating couplers measured by simulation and experiment[77]; (c) schematic diagram of the double-layer silicon nitride grating coupler structure[78]; (d) simulated and measured coupling efficiency curves for grating couplers with different lateral layouts (circular, elliptical and rectangular). The blue error bar represents 1 standard deviation of the average insertion loss of the elliptical layout[78]

5 富硅氮化硅波导非线性应用

在 PIC 应用中, 基于氮化硅材料的集成光波导[11, 79-83] 具有宽带低损、无双光子吸收的特点, 且对光具有一定的局域能力, 使其在上世纪 70, 80 年代就受到了广泛的关注, 并有相关工作报道了使用氮化硅材料制备的薄膜平板波导[84-85] 以及条形波导[86-87]。而随着时间的推移和技术的进步, 各种降低氮化硅波导损耗的优化方法也被相继提出, 如高温退火处理以减少有害的散射基团、优化蚀刻以减少侧壁损耗等等。在 2017 年, 美国纽约大学的 Michal Lipson 等人就通过各种方法减小条形波导表面的粗糙度, 最终将普通氮化硅波导的损耗控制在 1 dB/m 以内[88], 而类似的硅材料波导结构的损耗往往为 3 dB/m[89], 甚至是 10 dB/m~50 dB/m[90]。这种低损耗特性也使得普通氮化硅波导被应用于一些大带宽、高功率的非线性光学元件中[91-93]。例如, 在 2015 年, 新加坡 A*STAR 的 Doris K. T. Ng 等人就通过调节 ICP-CVD 反应气体的参数使得其富硅氮化硅薄膜在 1 550 nm 的折射率从 2.2 增加到 3.08, 并保持一个近乎为 0 的消光系数[94]。2017 年, 瑞典查尔姆斯理工大学的 Clemens J. KRÜCKEL 课题组利用低压化学气相沉积(LPCVD)系统制备富硅氮化硅薄膜材料, 通过不同气体流量比得到折射率与非线性克尔系数不同的富硅氮化硅薄膜并制备了一系列波导结构[95]。虽然实验所得波导损耗也随着折射率的增加从 0.4 dB/cm 上升到 7.3 dB/cm, 但是 LPCVD 下制备的普通氮化硅的克尔系数仅为$(0.31\pm 0.04)\times 10^{-18}$ m^2/W, 而富硅氮化硅的克尔系数可通过气体比例调节提高到$(1.13 \pm 0.13)\times 10^{-18}$ m^2/W。此外, 相比于硅材料, 富硅氮化硅在通讯波段有更大的带隙, 也不存在双光子吸收和自由载流子效应, 从而在更宽的波长范围内具有较低的线性和非线性损耗。这些特性使得富硅氮化硅波导在高次谐波的产生与波长转换[96-103] 和连续光谱与频率梳产生[104-107] 等非线性应用中具有重要的应用价值。

5.1 谐波产生与波长转换

全光波长转换可以提高信号传输的频谱利用率和系统容量, 是全光网络中的一项关键技术, 也是非线性光学最吸引人的应用之一。它是指不经过光-电处理, 直接在光域内将某一波长(频率)的光信号直接转换到另一波长(频率)上的转换技术。而全光波长转换离不开高阶谐波的产生。富硅氮化硅材料色散均匀、非线性系数大的特点在谐波产生与波长转换上有很大优势。2015 年, 瑞典 Clemens J. KRÜCKEL 等人利用 LPCVD 制备了克尔系数为 1.4×10^{-18} m^2/W 的 700 nm 厚富硅氮化硅薄膜[96]。并通过干法蚀刻获得了高垂直度的富硅氮化硅条形波导, 测得其损耗约为 1.8 dB/cm, 在 1 570 nm 以上为 1.2 dB/cm。并在 1 563 nm 附近实现了波长转换, 转换效率为−37 dB, 图 9(a)所示。2017 年, 新加坡的 D. T. H. Tan 课题组使用线性折射率为 3.1 的富硅氮化物薄膜制成了条形波导, 并实现了将 1 620 nm 处的信号光到 1 450 nm 闲频光的超过 170 nm 的宽带波长转换。其峰值转换效率为−24.9 dB [97]。而在 2019 年, 法国勃艮第大学的 Manon Lamy 等人使用折射率为 2.53、克尔系数为 1.8×10^{-18} m^2/W 制备的富硅氮化硅条形波导, 在 2 μm 波长附近实现了效率为−18 dB 的波长转换及 10 Gbit/s 开关键控信号的低损耗传输[98]。同年, 英国南安普顿大学的 C. Lacava 等人通过双泵布拉格散射方案[99], 利用不同模式富硅氮化硅条形波导的折射率分布不同的特点, 实现相位匹配和色散工程控制, 进而在 40 nm 带宽上实现了最大转换效率为−15 dB 的波长转换。为了增强非线性效应, 获得更高的转化效率, 人们往往会引入慢光效应, 降低光的群速度使光子充分跟物质相互作用。在 2017 年, 英国的 Kapil Debnath 等人利用折射率为 2.54 的富硅氮化硅材料分别设计并制备了用于电信波长的悬浮二维 W1 光子晶体波导和 W0.7 光子晶体波导用于实现良好的慢光效果[100]。对于 W1 光子晶体波导, 实验测得群折射率大于 110, 与 Si 光子晶体波导的测量值相当。但 W1 波导传输带宽仅为 20 nm, 传输损耗为 53 dB/cm。而 W0.7 光子晶体波导, 在快光区的群折射率为 7.4, 传输带宽能超过 70 nm, 传输损耗为 4.6 dB/cm。该工作促进了富硅氮化硅材料在集成光子晶体器件上的应用。在 2020 年, 新加坡 D. T. H. Tan 课题组还利用富硅氮化硅光子晶体波导实现了四波混频[101], 实验测得光参量信号增益达到−3 dB, 瞬时闲频转换效率达到 1 dB, 通过光子晶体非线性增强实现了每单位长度上 333 dB/cm 大的开关增益。

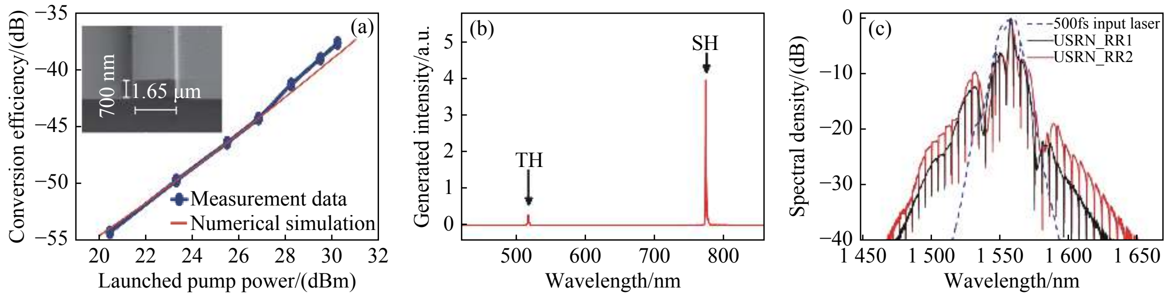


图 9　富硅氮化硅材料的非线性应用。(a)高垂直度低损耗富硅氮化硅波导实现波长转换[96];(b)富硅氮化硅光子晶体微腔获得二次与三次谐波[103];(c)富硅氮化硅谐振环结构观察到自相位调制获得光谱展宽[105]

Fig. 9　Silicon-rich nitride materials for nonlinear applications. (a) High-perpendicularity and low-loss silicon-rich nitride waveguide for wavelength conversion[96]; (b) second and third harmonics generated by silicon-rich nitride photonic crystal cavity[103]; (c) spectral broadening obtained by self phase modulation in silicon-rich nitride micro ring resonator[105]

增强非线性效应的方法除了利用慢光效应增强光与物质的相互作用外,通过谐振腔或谐振环将光局域在一个较小的空间范围内是增强光与物质相互作用的最有效途径之一。2015 年,中国台湾大学的 Gong-Ru Lin 等利用 PECVD 沉积硅含量为 23.4%、克尔系数为 2.17×10^{-13} cm^2/W 的富硅氮化硅薄膜,并制备了由波导和微环结构组成的非线性克尔开关的微环谐振器结构[102]。实验测得微环谐振器的质量因数 Q 为 11 000,通过该微环谐振器结构,他们演示了 12 Gbit/s 速率下的光开关键控数据的波长和格式转换,暗示了富硅氮化硅材料在全光通信网络中全光交叉波长转换和数据格式转换方面具有很好的应用前景。2019 年,意大利的 Marco Clementi 研究小组利用光子晶体微腔获得了高达 13 000 品质因子 Q,进而得到了二次谐波和三次谐波产生效率分别为 $(4.7\pm0.2)\times10^{-7}$ W^{-1} 和 $(5.9\pm0.3)\times10^{-5}$ W^{-2}[103],如图 9(b)所示。

5.2　连续光谱与频率梳

与波长转换类似,宽带超连续谱的产生依赖于较强的非线性效应和合适的波导色散。而自相位调制(Self-Phase Modulation, SPM)便是一种能够实现超连续谱产生的非线性效应。2015 年,新加坡科技设计大学的 Ting Wang 等人[104] 通过设定了合适的富硅氮化硅薄膜的硅含量,使薄膜具有足够大的带隙以消除 1 550 nm 处的双光子吸收,又同时具有与非晶硅相当的非线性克尔系数(2.8×10^{-13} cm^2/W)。他们制备了 4 μm 宽、300 nm 厚的富硅氮化硅波导,测得其传输损耗为 7 dB/cm。在 3 W 的输入峰值功率下,获得了约 2.5π 的非线性相移以及形状高度对称的自相位调制,从而实现了超过 0.6 倍频程的超连续谱。第二年,他们还利用品质因子 Q>10 000 的谐振环结构及长度仅为 430 μm 的富硅氮化硅波导观察到两倍的自相位调制引起的光谱展宽,最大的展宽宽度为 270 nm,相当于基本输入的 4.5 倍[105],如图 9(c)所示。2016 年,丹麦大学 Xing Liu 课题组利用 10 mm 长的富硅氮化硅波导实现−30 dB 阈值下 800 nm~2 400 nm 超连续光谱[106]。2019 年,瑞典查尔姆斯理工大学 Zhichao Ye 等人通过退火工艺制备了低损耗(0.4 dB/cm)的富硅氮化硅波导[107],并在 C 波段和 L 波段实现了半径为 22 μm 的富硅氮化硅微环谐振器,其品质因子达 800 000,获得了 1 300 nm~2 000 nm 的宽带低噪声微环谐振腔频率梳。

6　总结与展望

本文主要介绍了 CMOS 兼容的氮化硅材料的光学特性及其微纳光学器件研究进展。在材料光学特性方面,普通氮化硅具有较低的折射率、较大的能带间隙和大范围的透明光学窗口,该窗口覆盖可见光到中红外波段,意味着普通氮化硅材料具有宽带低吸收特性,在集成光子器件中能实现宽带低损耗的性能。而通过在制备过程中调节相关气体参数,还能制备出保留了普通氮化硅光学特性的、折射率相对较高的富硅氮化硅薄膜材料,从而使得氮化硅材料的折射率范围扩展到

了 1.9~3.2 之间, 而对应的消光系数和非线性系数也具有可调控区间, 这大大丰富了器件设计中材料选择的自由度, 使其在薄膜光学、微纳平面光学和非线性集成光学等领域中具有巨大的吸引力。首先介绍了氮化硅光学薄膜在紫外带通滤波、可见光和近红外宽带减反、选择性反射等选择性功能薄膜方面的实验研究结果, 并展示了其被应用在太阳能电池的效率改善和美观上。然后阐述了氮化硅材料在超构表面和光栅耦合器方面的应用。在超构表面方面, 基于低损耗氮化硅材料的超构透镜在消球差、消色差、长焦深、变焦设计等方面都了相关研究, 期间氮化硅超构透镜的口径还从微米口径发展到了厘米口径; 在颜色调控上, 氮化硅超构表面也实现了像素级的 RGB 滤色; 而在特殊光束生成、光致发光、光束整形等方面, 氮化硅超构表面也有了初步的研究进展。在光栅耦合器方面, 由于氮化硅材料自身较低的等效折射率, 氮化硅光栅耦合器在实现更大的耦合带宽上具有天然的优势。均匀的氮化硅光栅较难获得高的耦合效率, 但通过变迹设计、底部反射镜设计或双层光栅设计, 可以有效地提升氮化硅光栅耦合器的耦合效率。最后, 本文还介绍了富硅氮化硅材料在集成光波导的非线性应用, 特别是在全光波长转换、连续光谱与频率梳方面。由于富硅氮化硅在保持 CMOS 兼容性的同时拥有较大的可调控的光学非线性系数, 而且无双光子吸收, 这使得富硅氮化硅在自相位调制、高次谐波产生等非线性应用中拥有非常大的优势, 在低损耗、大功率、高增益非线性光学器件中具有巨大的潜力。总的来说, CMOS 兼容的氮化硅材料, 凭借其宽带低损、折射率可调、非线性系数灵活等优异的光学特性, 在光学薄膜、超构平面光学元件和集成光子器件等方面都展现出来优异的性能, 氮化硅基微纳光子学器件具有重大的潜在应用价值。

参考文献:

[1] 王正军. 氮化硅陶瓷的研究进展[J]. 材料科学与工艺, 2009, 17(2): 155-158.
WANG ZH J. Research progress of silicon nitride ceramic[J]. *Materials Science & Technology*, 2009, 17(2): 155-158. (in Chinese)

[2] LANGE H, WÖTTING G, WINTER G. Silicon nitride—from powder synthesis to ceramic materials[J]. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 1991, 30(12): 1579-1597.

[3] DANTE R C, KAJDAS C K. A review and a fundamental theory of silicon nitride tribochemistry[J]. *Wear*, 2012, 288: 27-38.

[4] KALOYEROS A E, JOVÉ F A, GOFF J, *et al*.. Review—silicon nitride and silicon nitride-rich thin film technologies: trends in deposition techniques and related applications[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2017, 6(10): P691-P714.

[5] BALÁZSI C, KÓNYA Z, WÉBER F, *et al*.. Preparation and characterization of carbon nanotube reinforced silicon nitride composites[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2003, 23(6-8): 1133-1137.

[6] ŠAJGALIK P, DUSZA J, HOFFMANN M J. Relationship between microstructure, toughening mechanisms, and fracture toughness of reinforced silicon nitride ceramics[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, 78(10): 2619-2624.

[7] SCHMIDT S, HÄNNINEN T, GOYENOLA C, *et al*.. SiN_x coatings deposited by reactive high power impulse magnetron sputtering: process parameters influencing the nitrogen content[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(31): 20385-20395.

[8] 邢武超. 高导热氮化硅陶瓷的低温制备及性能研究[D]. 郑州: 郑州航空工业管理学院, 2020.
XING W CH. Study on low temperature preparation and properties of Silicon Nitride ceramics with high thermal conductivity[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Aeronautics, 2020. (in Chinese)

[9] RAIDER S I, FLITSCH R, ABOAF J A, *et al*.. Surface oxidation of silicon nitride films[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1976, 123(4): 560-565.

[10] LUBE T, DUSZA J. A silicon nitride reference material—A testing program of ESIS TC6[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, 27(2-3): 1203-1209.

[11] MUÑOZ P, MICÓ G, BRU L A, *et al*.. Silicon nitride photonic integration platforms for visible, near-infrared and mid-

infrared applications[J]. *Sensors*, 2017, 17(9): 2088.

[12] FAN ZH 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.

[13] YE M, PENG Y H, YI Y SH. Silicon-rich silicon nitride thin films for subwavelength grating metalens[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(3): 1200-1207.

[14] TAN D T H, OOI K J A, NG D K T. Nonlinear optics on silicon-rich nitride-a high nonlinear figure of merit CMOS platform [Invited][J]. *Photonics Research*, 2018, 6(5): B50-B66.

[15] DAI J P, GAO W, LIU B, *et al*.. Design and fabrication of UV band-pass filters based on SiO_2/Si_3N_4 dielectric distributed bragg reflectors[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 364: 886-891.

[16] LI J D, SHEN G S, CHEN W L, *et al*.. Preparation of SiN_x multilayer films by mid-frequency magnetron sputtering for crystalline silicon solar cells[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2017, 59: 40-44.

[17] SOMAN A, ANTONY A. Broad range refractive index engineering of Si_xN_y and SiO_xN_y thin films and exploring their potential applications in crystalline silicon solar cells[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2017, 197: 181-191.

[18] SOMAN A, ANTONY A. Tuneable and spectrally selective broadband reflector – Modulated photonic crystals and its application in solar cells[J]. *Solar Energy*, 2018, 162: 525-532.

[19] SOMAN A, ANTONY A. Colored solar cells with spectrally selective photonic crystal reflectors for application in building integrated photovoltaics[J]. *Solar Energy*, 2019, 181: 1-8.

[20] ZHAN A L, COLBURN S, TRIVEDI R, *et al*.. Low-contrast dielectric metasurface optics[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(2): 209-214.

[21] ZHAO W, LI X Y, LI S Q, *et al*.. Sub-wavelength focusing based on all-dielectric polarization-independent metalens[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2018, 32(29): 1850321.

[22] PARK J W, BAE S I, JEONG K H. Silicon nitride metalens for optical imaging[C]. *2018 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN)*, IEEE, 2018: 1-5.

[23] YE M, RAY V, PENG Y H, *et al*.. Linear polarization distinguishing metalens in visible wavelength[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(2): 399-402.

[24] COLBURN S, ZHAN A L, MAJUMDAR A. Metasurface optics for full-color computational imaging[J]. *Science Advances*, 2018, 4(2): eaar2114.

[25] COLBURN S, MAJUMDAR A. Simultaneous achromatic and varifocal imaging with quartic metasurfaces in the visible[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(1): 120-127.

[26] FAN ZH B, QIU H Y, ZHANG H L, *et al*.. A broadband achromatic metalens array for integral imaging in the visible[J]. *Light*: *Science & Applications*, 2019, 8: 67.

[27] HUO Z H, PANG X N, WANG H, *et al*.. Engineering the chromatic dispersion in dual-wavelength metalenses for unpolarized visible light[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11170: 111702H.

[28] LIU Y, YU Q Y, CHEN Z M, *et al*.. Meta-objective with sub-micrometer resolution for microendoscopes[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(2): 106-115.

[29] ZHAO M X, CHEN M K, ZHUANG Z P, *et al*.. Phase characterisation of metalenses[J]. *Light*: *Science & Applications*, 2021, 10(1): 52.

[30] BAYATI E, PESTOURIE R, COLBURN S, *et al*.. Inverse designed metalenses with extended depth of focus[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(4): 873-878.

[31] HUANG L CH, WHITEHEAD J, COLBURN S, *et al*.. Design and analysis of extended depth of focus metalenses for achromatic computational imaging[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(10): 1613-1623.

[32] ZHAN A L, COLBURN S, DODSON C M, *et al*.. Metasurface freeform nanophotonics[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1673.

[33] COLBURN S, ZHAN A L, MAJUMDAR A. Varifocal zoom imaging with large area focal length adjustable metalenses[J]. *Optica*, 2018, 5(7): 825-831.

[34] HAN ZH Y, COLBURN S, MAJUMDAR A, *et al*.. MEMS-actuated metasurface Alvarez lens[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2020, 6(1): 79.

[35] MIYATA M, NAKAJIMA M, HASHIMOTO T. Compound-eye metasurface optics enabling a high-sensitivity, ultra-thin polarization camera[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9996-10014.

[36] KANWAL S, WEN J, YU B B, *et al*.. High-efficiency, broadband, near diffraction-limited, dielectric metalens in ultraviolet spectrum[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(3): 490.

[37] 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.

[38] WU SH L, YE Y, DUAN H G, *et al*.. Large-area, optical variable-color metasurfaces based on pixelated plasmonic nanogratings[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(7): 1801302.

[39] PARK C S, 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.

[40] GONZÁLEZ-ALCALDE A K, SALAS-MONTIEL R, KALT V, *et al*.. Engineering colors in all-dielectric metasurfaces: metamodeling approach[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(1): 89-92.

[41] YANG J H, BABICHEVA V E, YU M W, *et al*.. Structural colors enabled by lattice resonance on silicon nitride metasurfaces[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(5): 5678-5685.

[42] HONG Y F, LEI Y F, FANG X M, *et al*.. All-dielectric high saturation structural colors with Si_3N_4 metasurface[J]. *Modern Physics Letters B*, 2020, 34(14): 2050142.

[43] ÜSTÜN K, TURHAN-SAYAN G. Wideband long wave infrared metamaterial absorbers based on silicon nitride[J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(20): 203101.

[44] JANG M, HORIE Y, SHIBUKAWA A, *et al*.. Wavefront shaping with disorder-engineered metasurfaces[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(2): 84-90.

[45] FLANNERY J, AL MARUF R, YOON T, *et al*.. Fabry-pérot cavity formed with dielectric metasurfaces in a hollow-core fiber[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(2): 337-341.

[46] KARVOUNIS A, ASPIOTIS N, ZEIMPEKIS I, *et al*.. Mechanochromic reconfigurable metasurfaces[J]. *Advanced Science*, 2019, 6(21): 1900974.

[47] WANG J G, SHAO Z K, WEN Y H, *et al*.. All-dielectric metasurface grating for on-chip multi-channel orbital angular momentum generation and detection[J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 18794-18802.

[48] CHEN R J, CHEN Y J, WEN Y H, *et al*.. Generating helical beams based on silicon-rich nitride metasurface[C]. A*sia Communications and Photonics Conference (ACPC) 2019*, OSA, 2019: M4A. 307.

[49] YE M, RAY V, WU D CH, *et al*.. Metalens with artificial focus pattern[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(5): 251-254.

[50] CHEN Y Y, MIAO SH N, WANG T M, *et al*.. Metasurface integrated monolayer exciton polariton[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(7): 5292-5300.

[51] LIN W, WEN Y H, CHEN Y J, *et al*.. Generation of accelerating beams with autofocusing properties using dielectric metasurface for polarization control[C]. *2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACPC)*, OSA, 2019: M4B.7.

[52] BERESNA M, GHOLIPOUR B, LEE T, *et al*.. Femtosecond laser assisted fabrication of visible wavelength all-dielectric nano-membrane metasurfaces[C]. *2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*, IEEE, 2019: 1.

[53] ZHU L Q, YUAN SH, ZENG CH, *et al*.. Photoluminescence enhancement of MoS_2 via dielectric metasurface[C]. *2019 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN)*, IEEE, 2019: 44-45.

[54] ROMANO S, ZITO G, PENZO E, *et al*.. Enhancing light-matter interaction in all-dielectric photonic crystal metasurfaces[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11028: 110280I.

[55] MENON S, PROSAD A, BISWAS R, *et al*.. Silicon nitride based guided mode resonance structures for enhancement of nonlinear optical effects[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11345: 113451J.

[56] YIN X F, JIN J CH, SOLJAČIĆ M, *et al*.. Observation of topologically enabled unidirectional guided resonances[J]. *Nature*, 2020, 580(7804): 467-471.

[57] MAIRE G, VIVIEN L, SATTLER G, *et al*.. High efficiency silicon nitride surface grating couplers[J]. *Optics Express*, 2008, 16(1): 328-333.

[58] DOERR C R, CHEN L, CHEN Y K, *et al*.. Wide bandwidth silicon nitride grating coupler[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(19): 1461-1463.

[59] ROMERO-GARCÍA S, MERGET F, ZHONG F, *et al*.. Silicon nitride CMOS-compatible platform for integrated

photonics applications at visible wavelengths[J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 14036-14046.

[60] ZHANG H J, LI CH, TU X G, *et al*.. High efficiency silicon nitride grating coupler[J]. *Applied Physics A*, 2014, 115(1): 79-82.

[61] ZHAO X J, LI D P, ZENG CH, *et al*.. Compact grating coupler for 700-nm silicon nitride strip waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(4): 1322-1327.

[62] LITVIK J, DOLNAK I, DADO M. Waveguide silicon nitride grating coupler[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10142: 1014213.

[63] CHEN Y, HALIR R, MOLINA-FERNÁNDEZ Í, *et al*.. High-efficiency apodized-imaging chip-fiber grating coupler for silicon nitride waveguides[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 5059-5062.

[64] CHEN Y, DOMÍNGUEZ BUCIO T, KHOKHAR A Z, *et al*.. Experimental demonstration of an apodized-imaging chip-fiber grating coupler for Si_3N_4 waveguides[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(18): 3566-3569.

[65] SUBRAMANIAN A Z, SELVARAJA S, VERHEYEN P, *et al*.. Near-infrared grating couplers for silicon nitride photonic wires[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(19): 1700-1703.

[66] URA S, MORI K, TSUJIMOTO R, *et al*.. Position dependence of coupling efficiency of grating coupler in waveguide cavity[C]. *2017 IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, IEEE, 2017: 1619-1626.

[67] DWIVEDI S, SONG B W, LIU Y, *et al*.. Demonstration of compact silicon nitride grating coupler arrays for fan-out of multicore fibers[C]. *2017 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, OSA, 2017: ATh3B. 4.

[68] NAMBIAR S, HEMALATHA M, SHARMA T, *et al*.. Integrated silicon nitride based TE dual-band grating coupler[C]. *2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*, IEEE, 2017: 1.

[69] WANG SH L, HAO R. High performance apodized grating coupler for 700nm Si_3N_4 waveguides[C]. *2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN)*, IEEE, 2016: 1-3.

[70] ZHANG H J, LI CH, TU X G, *et al*.. Efficient silicon nitride grating coupler with distributed Bragg reflectors[J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 21800-21805.

[71] ZOU J H, YU Y, YE M Y, *et al*.. Ultra efficient silicon nitride grating coupler with bottom grating reflector[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26305-26312.

[72] HONG J X, YOKOYAMA S. Efficient silicon nitride grating coupler with a dielectric multilayer reflector[C]. *2017 22nd Microoptics Conference (MOC)*, IEEE, 2017: 58-59.

[73] 张赞允, 朱华, 李鸿强. 高效率低向上反射的氮化硅光栅耦合器[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2018, 31(4): 31-36.

ZHANG Z Y, ZHU H, LI H Q. High efficiency and low upward reflection silicon nitride grating coupler[J]. *Journal of Liaocheng University* (*Natural Science*), 2018, 31(4): 31-36. (in Chinese)

[74] NAMBIAR S, KUMAR A, KALLEGA R, *et al*.. High-efficiency grating coupler in 400 nm and 500 nm PECVD silicon nitride with bottom reflector[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(5): 2201213.

[75] ROMERO-GARCÍA S, MERGET F, ZHONG F, *et al*.. Visible wavelength silicon nitride focusing grating coupler with AlCu/TiN reflector[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2521-2523.

[76] SACHER W D, HUANG Y, DING L, *et al*.. Wide bandwidth and high coupling efficiency Si_3N_4-on-SOI dual-level grating coupler[J]. *Optics Express*, 2014, 22(9): 10938-10947.

[77] XU P F, ZHANG Y F, SHAO Z K, *et al*.. High-efficiency wideband SiN_x-on-SOI grating coupler with low fabrication complexity[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(17): 3391-3394.

[78] ONG E W, FAHRENKOPF N M, COOLBAUGH D D. SiN_x bilayer grating coupler for photonic systems[J]. *OSA Continuum*, 2018, 1(1): 13-25.

[79] ROELOFFZEN C G H, HOEKMAN M, KLEIN E J, *et al*.. Low-loss Si_3N_4 TriPleX optical waveguides: technology and applications overview[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(4): 4400321.

[80] BLUMENTHAL D J, HEIDEMAN R, GEUZEBROEK D, *et al*.. Silicon nitride in silicon photonics[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2018, 106(12): 2209-2231.

[81] PORCEL M A G, HINOJOSA A, JANS H, *et al*.. [INVITED] Silicon nitride photonic integration for visible light applications[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 112: 299-306.

[82] MOSS D J, MORANDOTTI R, GAETA A L, *et al*.. New CMOS-compatible platforms based on silicon nitride and

Hydex for nonlinear optics[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(8): 597-607.
[83] ROELOFFZEN C G H, ZHUANG L M, TADDEI C, *et al*.. Silicon nitride microwave photonic circuits[J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22937-22961.
[84] BOYD J T, KUO C S. Composite prism-grating coupler for coupling light into high refractive index thin-film waveguides[J]. *Applied Optics*, 1976, 15(7): 1681-1683.
[85] STUTIUS W, STREIFER W. Silicon nitride films on silicon for optical waveguides[J]. *Applied Optics*, 1977, 16(12): 3218-3222.
[86] BOYD J T, WU R W, ZELMON D E, *et al*.. Planar and channel optical waveguides utilizing silicon technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 1985, 517: 100-105.
[87] HENRY C H, KAZARINOV R F, LEE H J, *et al*.. Low loss Si_3N_4-SiO_2 optical waveguides on Si[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(13): 2621-2624.
[88] JI X CH, BARBOSA F A S, ROBERTS S P, *et al*.. Ultra-low-loss on-chip resonators with sub-milliwatt parametric oscillation threshold[J]. *Optica*, 2017, 4(6): 619-624.
[89] BIBERMAN A, SHAW M J, TIMURDOGAN E, *et al*.. Ultralow-loss silicon ring resonators[C]. *IEEE 9th International Conference on Group IV Photonics*, IEEE, 2012: 39-41.
[90] KOBAYASHI N, SATO K, NAMIWAKA M, *et al*.. Silicon photonic hybrid ring-filter external cavity wavelength tunable lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(6): 1241-1246.
[91] HERR T, HARTINGER K, RIEMENSBERGER J, *et al*.. Universal formation dynamics and noise of Kerr-frequency combs in microresonators[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 480-487.
[92] EPPING J P, HELLWIG T, HOEKMAN M, *et al*.. On-chip visible-to-infrared supercontinuum generation with more than 495 THz spectral bandwidth[J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19596-19604.
[93] LI Q, DAVANÇO M, SRINIVASAN K. Efficient and low-noise single-photon-level frequency conversion interfaces using silicon nanophotonics[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(6): 406-414.
[94] NG D K T, WANG Q, WANG T, *et al*.. exploring high refractive index silicon-rich nitride films by low-temperature inductively coupled plasma chemical vapor deposition and applications for integrated waveguides[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(39): 21884-21889.
[95] KRÜCKEL C J, FÜLÖP A, YE ZH CH, *et al*.. Optical bandgap engineering in nonlinear silicon nitride waveguides[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 15370-15380.
[96] KRÜCKEL C J, FÜLÖP A, KLINTBERG T, *et al*.. Linear and nonlinear characterization of low-stress high-confinement silicon-rich nitride waveguides[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25827-25837.
[97] OOI K J A, NG D K T, WANG T, *et al*.. Pushing the limits of CMOS optical parametric amplifiers with USRN: Si_7N_3 above the two-photon absorption edge[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 13878.
[98] LAMY M, FINOT C, PARRIAUX A, *et al*.. Si-rich Si nitride waveguides for optical transmissions and toward wavelength conversion around 2 μm[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(19): 5165-5169.
[99] LACAVA C, DOMINGUEZ BUCIO T, KHOKHAR A Z, *et al*.. Intermodal frequency generation in silicon-rich silicon nitride waveguides[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(6): 615-621.
[100] DEBNATH K, BUCIO T D, AL-ATTILI A, *et al*.. Photonic crystal waveguides on silicon rich nitride platform[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3214-3221.
[101] SAHIN E, NG D K T, TAN D T H. Optical parametric gain in CMOS-compatible sub-100 μm photonic crystal waveguides[J]. *APL Photonics*, 2020, 5(6): 066108.
[102] LIN G R, SU SH P, WU C L, *et al*.. Si-rich SiN_x based Kerr switch enables optical data conversion up to 12 Gbit/s[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9611.
[103] CLEMENTI M, DEBNATH K, SOTTO M, *et al*.. Cavity-enhanced harmonic generation in silicon rich nitride photonic crystal microresonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(13): 131103.
[104] WANG T, NG D K T, NG S K, *et al*.. Supercontinuum generation in bandgap engineered, back-end CMOS compatible silicon rich nitride waveguides[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(5): 498-506.
[105] CHOI J W, CHEN G F R, NG D K T, *et al*.. Wideband nonlinear spectral broadening in ultra-short ultra - silicon rich nitride waveguides[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27120.
[106] LIU X, PU M H, ZHOU B B, *et al*.. Octave-spanning supercontinuum generation in a silicon-rich nitride

waveguide[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(12): 2719-2722.

[107] YE ZH CH, FÜLÖP A, HELGASON Ó B, *et al*.. Low-loss high-*Q* silicon-rich silicon nitride microresonators for Kerr nonlinear optics[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(13): 3326-3329.

作者简介:

董建文(1981-),男,广东广州人,博士,教授,博士生导师,2003 年,2007 年于中山大学分别获得学士,博士学位,主要从事硅光超材料、拓扑光子学、光子晶体与超透镜、超微光学成像等研究。Email: dongjwen@mail.sysu.edu.cn

《中国光学》征稿启事