光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021071304

布拉格光栅结构 RGB 波导复用/解复用器的光学特性

陈　直*

（上海电子信息职业技术学院 通信与信息工程学院，上海 201411）

摘　要： 针对系统小型化和集成化的发展需求，文章提出了一种基于布拉格光栅结构的红绿蓝(RGB)波导复用/解复用器，系统研究了刻槽深度、周期数量等光栅特征参数对该复用/解复用器性能的影响。研究表明，相对于传统的硅基材料，基于 SU8 材料的复用/解复用器具有良好的透过率和柔韧性，并且其结构紧凑，波导横截面只有几百纳米，长度仅为几十微米。该复用/解复用器的光学特性主要受到刻槽深度与周期数量的影响，表现为随刻槽深度的增大，反射谱的中心波长先红移后蓝移，反射谱的宽度几乎正比例增大，反射谱的峰值逐渐趋于饱和；而随着周期数量的增多，反射谱的宽度变化不明显，反射谱的峰值逐渐趋于饱和。基于这些特性设计的 SU8 材料布拉格光栅结构 RGB 复用/解复用器实现了复用和解复用的功能，为 RGB 复用/解复用器的小型化、集成化和柔性化奠定了基础。

关键词： 复用/解复用；红绿蓝；可见光集成；布拉格光栅

中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2021)06－0789－06

Optical Properties of RGB Waveguide Multiplexers/Demultiplexers with Bragg Grating Structure

CHEN Zhi

(School of Comm. and Inform. Engineering, Shanghai Technical Institute of Electronics Information, Shanghai 201411, CHN)

Abstract: To satisfy the needs of system miniaturization and integration, a Bragg grating-based RGB waveguide multiplexer/de-multiplexer was proposed, and the relationship between its performance and grating characteristic parameters such as grooving depth and period number were systematically studied. The results show that a SU-8 RGB multiplexer/de-multiplexer has a compact structure with cross section of only a few hundred nanometers and a length of dozens of microns, and exhibits better transmittance and flexibility than a traditional silicon materials component. The optical properties of the RGB multiplexer/de-multiplexer are mainly affected by its grooving depth and period number. With increase of the groove depth, the central wavelength of the reflection spectrum exhibits red shift first and blue shift later, the width of the reflection spectrum increases almost directly, and the peak value of the reflection spectrum tends to saturate gradually. However, with the increase of the period number, the width of the reflection spectrum does not change significantly, and the peak value of the emission spectrum tends to saturate gradually. Based on such characteristics, the proposed design realizes the RGB multiplexing/de-multiplexing, laying a solid foundation for the miniaturization, integration, and flexibility of RGB multiplexer/de-multiplexer.

Key words: multiplexer/demultiplexer; RGB; visible light integration; Bragg grating

收稿日期：2021－07－13.

基金项目：上海电子信息职业技术学院科研启动基金项目(B3-002-21-SYLZP07-0204)；上海电子信息职业技术学院室内环境监测及安全管理巡检机器人项目(E3-003-21-NH-JY-CXTD-0501-12).

* **通信作者：**陈　直

0 引言

正在高速发展的量子计算系统[1]、光学显示系统[2]与可见光通信系统[3-4]亟需性能优良、可集成、工艺兼容性较高的可见光复用/解复用光子器件。而且,随着贴肤智能诊疗设备和可穿戴智能显示系统的发展[5],光电子器件的柔性化集成备受关注[6-9]。目前,常规的红绿蓝(RGB)复用/解复用器主要有棱镜型和光纤型两种[10]。棱镜型 RGB 复用/解复用器不仅对工作环境的稳定性要求很高,而且耦合效率较低。光纤型 RGB 复用/解复用器的耦合器效率较高,但是体积较大。况且,这两种类型的 RGB 复用/解复用器都由分立器件组合而成,不具备可集成性。为了避免棱镜型和光纤型 RGB 复用/解复用器难以集成的问题,波导型 RGB 耦合器被提出[11-12]。

相比棱镜型和光纤型 RGB 复用/解复用器,波导型 RGB 复用/解复用器的体积小、耦合效率高、性能稳定、便于集成。经过多年的研究,这类 RGB 复用/解复用器的传输效率已经得到了显著提升[11],且器件尺寸也在逐渐减小[12]。然而,RGB 复用/解复用器在集成化的道路上仍然存在两个核心问题未能得到有效解决。第一个是现有的波导型 RGB 复用/解复用器均以拍长多路模间干涉原理为基础寻找共耦合所需的公倍数长度,不仅对器件的长度设计精度要求极高,而且限制了器件进一步小型化的空间。第二个是现有的波导型 RGB 复用/解复用器均采用硅基材料。由于硅基材料是一种高杨氏模量的刚性材料,不具备可弯折性,使得器件缺少柔性化,不能够适应未来人工智能装备柔性集成一体化的发展需要。布拉格光栅作为一种光学参量或空间结构具有周期性规律的器件,其占空比、刻槽形式及深度、周期数量等均有较大的自由度,近年来已被应用于多种光子器件,实现了良好的光学功能[13-15]。布拉格光栅的工作机理具有比较深刻的物理内涵[16-18],适用于构成各类光子功能器件,结合 SU-8[19-21]等柔性材料构成可弯折的 RGB 复用/解复器,在未来智能贴肤诊疗系统和超大带宽光通信系统中具有重要的应用潜力。

基于我们在可见光集成方向的前序工作[22-23],本文提出了一种基于布拉格光栅结构的 RGB 复用/解复用器,系统研究了刻槽深度、周期数量等光栅特征参数对该复用/解复用器性能的影响。相对于传统的硅基刚性材料,本文提出的基于 SU8 材料的 RGB 复用/解复用器具有机械柔韧性,适用于柔性化光电子器件的发展方向。与已有的 RGB 波导复用/解复用器相比,本文提出的 RGB 波导复用/解复用器不需要考虑繁琐的拍长多路模间干涉问题,因此具有较大的设计自由度,能够得到更短的器件长度。另外,SU8 柔性化设计在提高传输效率的同时,还具有良好的工艺兼容性,为片上柔性 RGB 波导复用/解复用器的集成化奠定了基础。

1 器件结构与工作原理

光与物质的相互作用是所有光子器件的理论基础。已有研究表明,光的波长与物质的特征尺寸之间存在能够决定两者作用机制的特定关系。以 X 射线晶体衍射为例[24],由于 X 射线的波长与晶体的晶格常数可比,因此具有周期性晶格排列的晶体对于 X 射线相当于一个衍射光栅。然而,对于波长大于 X 射线的光波来讲,同样一块晶体却只体现出均匀介质的特性。另外,介于衍射作用与均匀传输作用之间,还存在一种特殊的波长周期比 $\lambda/\Lambda=2n_{\mathrm{eff}}$,其中 λ 为光波波长,Λ 为物质的特征周期,n_{eff} 为有效折射率。在这种情况下,会出现所谓的布拉格谐振,导致前向传输光成指数衰减,最终几乎被完全反射回入射端。依照以上三种不同的波长周期比,可以划定出光与物质的三种不同作用机制,分别是体现出均匀作用的深亚波长传输、实现完全反射的布拉格共振以及常规衍射。其中,布拉格共振具有良好的全反射波长甄别特性,是光谱滤波和多波长复用/解复用的理想选择。对于颜色为红绿蓝(RGB)的三色光,其波长相较于天然晶体材料较大,较难直接寻找到适用于 RGB 三色光波段的天然布拉格光栅。因此,需要针对 RGB 三色光人为设计周期结构以实现布拉格栅格。基于布拉格光栅的光子器件通常是在光波导的基础上引入周期性折射率变化,使得原有的正交模式之间发生模间耦合,从而引起传输能量的重新分配。依据形成方式,布拉格光栅分为条形布拉格光栅、脊形布拉格光栅和变周期布拉格光栅等。文本采用条形布拉格光栅,其基本结构如图 1 所示,包括由波导芯层材料(Core)构成的布拉格光栅主体和由包层(Cladding)构成的覆盖层。h_{g} 为单边刻槽深度,w 为光栅宽度。其基本原理是在矩形波导两侧加入周期性微扰,使得正向传输的导模和反向传输的导模之间发生能量耦合,从而让

一部分特定波长的光完全反射回来，达到解复用的效果。

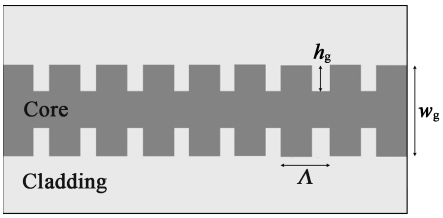


图 1　布拉格光栅结构示意图

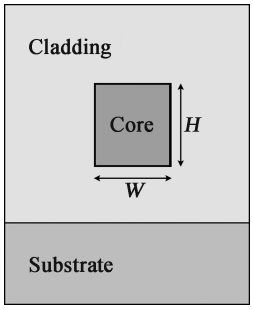
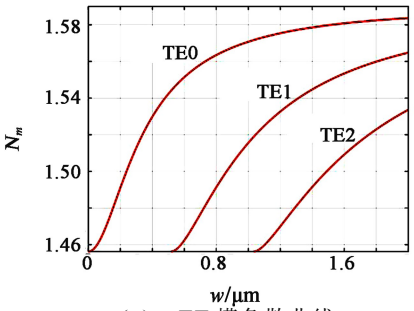


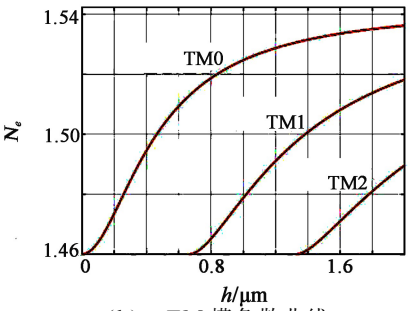
图 2　矩形波导横截图

由于片上条形布拉格光栅可以理解为在矩形波导的基础上加入周期性微扰，因此设计具有良好性能的矩形波导是其首要任务。考虑到 RGB 波段的特殊性，传统的 SOI 硅波导会产生较大的吸收损耗，不适用于目标材料。这里考虑相对 RGB 波段较为透明且可弯折的柔性化材料 SU-8 聚合物作为芯层材料，常规光学材料二氧化硅作为包层材料。矩形波导的横截面如图 2 所示，h 为波导芯层的厚度，w 为波导芯层的宽度，二者共同构成波导的特征尺寸。该特征尺寸决定了波导的模式数量和等效折射率。制作工艺只需在硅片(Substrate)上氧化生长出二氧化硅薄膜，而后再旋涂 SU8 光刻胶实行光刻和刻蚀，最后覆盖以二氧化硅包层。

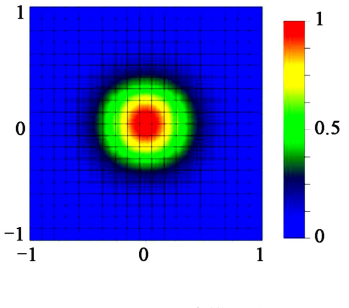
应用等效折射率法，计算得到 SU-8 聚合物材料波导在入射光波长为 550 nm 时的色散曲线，如图 3(a)和(b)所示。波导厚度方向上的 TM1 模式截至条件为 650 nm，宽度方向上的 TE1 模式截至条件为 510 nm。考虑到工艺能力，在确保单模的情况下应尽可能放宽波导尺寸，以给工艺容差创造空间。选择 500 nm×500 nm 的方形波导截面，不仅最大限度地使用了单模条件，还应用方形截面给器件与光纤的对接耦合创造了良好条件。该单模波导的归一化场分布如图 3(c)所示，可见光波被较好地限制在 500 nm×500 nm 范围内，形成了稳定的单模传输，其等效折射率为 1.502 4。



(a)　TE 模色散曲线



(b)　TM 模色散曲线



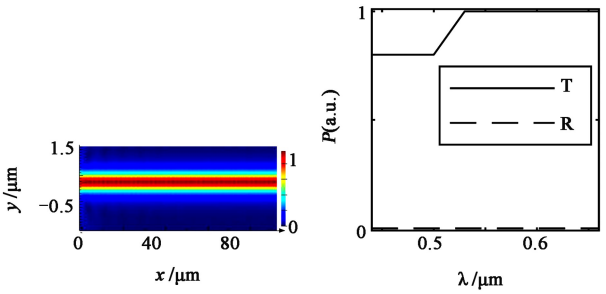
(c)　归一化单模光场

图 3　SU-8 波导的色散特性和单模传输光场

2　器件光学特性的分析与讨论

在单模光波导的基础上，引入折射率周期性变化的扰动，从而形成布拉格光栅。由耦合模理论可知，光栅占空比为 0.5 时正反传输模式之间的耦合效率最高，由此设置光栅的占空比为 0.5。根据布拉格条件和所求得的有效折射率，当光栅阶数为 1 时，周期是 183 nm，横截面宽和高均为 500 nm，侧壁刻蚀深度为 120 nm。满足以上条件的光栅在波长为 550 nm 左右处会产生布拉格共振，阻止该波长的光向前传输。为了构成 RGB 复用器，适当缩小光栅周期使得原有光栅结构的布拉格共振波长蓝移，从而让 440～660 nm 波段进入深亚波长传输区域，正常向前传输。研究表明，具有 40 nm 周期长度的光栅在 440～660 nm 超大带宽范围内，体现出了良好的传输能力，达到了 RGB 三色光复用的效果，如图 4(a)所示。然而，在 450～530 nm 范围内，器件出现了大约 20%的传输损耗，如图 4(b)所示。这个传输损耗是由于波长周期比相对较小，光栅产生了常规衍射效应所至。对于给定的光栅周期，通常波长比光栅周期大得越多，其深亚波长效应越明显。反之，衍射效应越强，传输损耗越大。530～

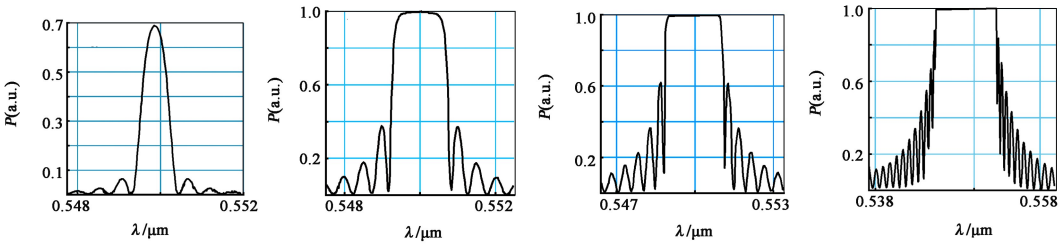
660 nm 范围内，传输效率接近 100%，说明光栅的深亚波长效应明显，传输通畅。



（a） 绿光(G)的轴向传输光场 （b） 透射与反射特性

图 4 RGB 复用器的传输特性

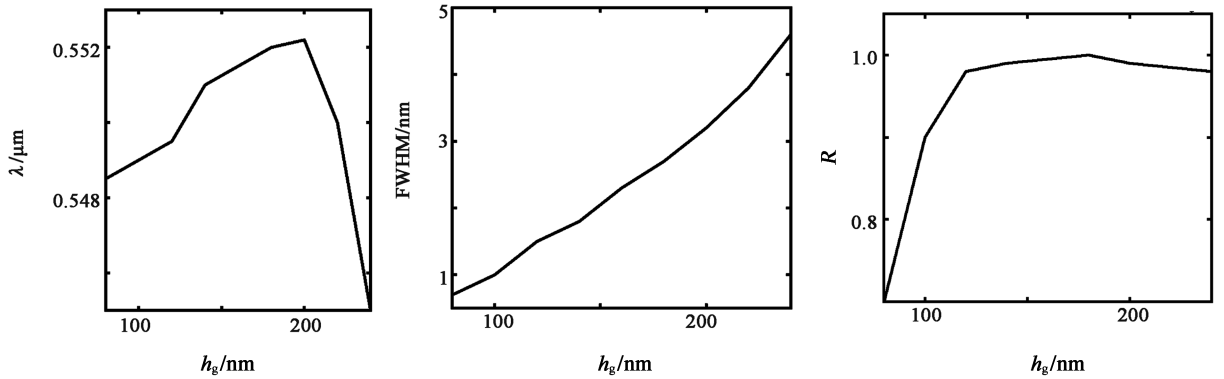
相对于复用而言，解复用的设计需要把目标波长设置成为布拉格波长，从而使其以反射的形式被滤出。同时，还要确保其余波长顺利通过。这里选取波长为 550 nm 的绿光(G)为目标过滤波长，波长为 450 nm 的蓝光(B)和 630 nm 的红光(R)为通过波长。布拉格光栅的光学特性对最终解复用器的实现至关重要。影响其光学特性的主要参数有刻槽深度与周期数量。图 5 展示了四种不同刻槽深度的光栅的反射光谱，从中可以清晰地发现反射谱的宽度随着刻槽深度的增加而延展，反射谱的中心波长随着刻槽深度的增加而偏移，反射谱的旁瓣随着刻槽深度的增加而增多。



（a） h_g=80 nm （b） h_g=160 nm （c） h_g=200 nm （d） h_g=240 nm

图 5 不同刻槽深度对应的布拉格光栅的反射谱

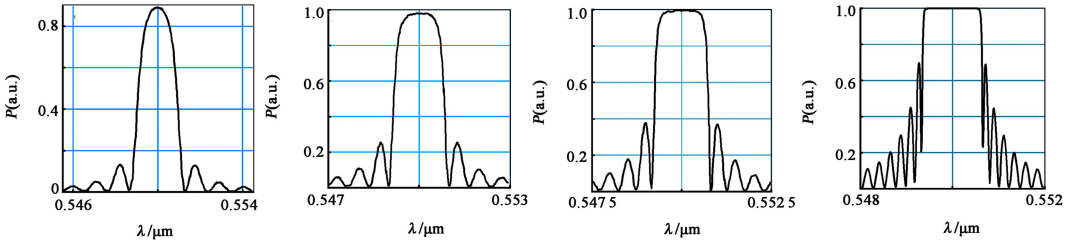
为了进一步研究刻槽深度对布拉格光栅的性能影响，在 80～240 nm 范围内，逐渐增大刻槽深度，对比观察反射谱的延展宽度、中心移动距离和最大反射率的变化，如图 6 所示。以 80 nm 刻槽深度的反射谱为基准，发现在 80～200 nm 范围内，谱的中心波长随刻槽深度的增大而发生红移；刻槽深度大于 200 nm 后，谱的中心波长随刻槽深度的增大而反向蓝移；在刻槽深度为 80～240 nm 范围内，反射谱的中心波长振动较小，不超过 7 nm，如图 6(a)所示。中心波长的移动伴随着反射谱的延展，其延展程度与刻槽深度几乎成正比例关系，如图 6(b)所示。从光波传输的角度看，刻槽深度的改变会影响正反传输模式的耦合效果，从而决定反射谱的最大反射率。在刻槽深度为 80～240 nm 范围内，最大反射率(R)呈现出先升后降的规律，其数值在刻槽深度为 120～180 nm 范围内变化较为平缓，大于 180 nm 后开始下降，如图 6(c)所示。总结以上规律，随着刻槽深度的增加，反射谱的中心波长表现出先红移再蓝移的特性，变化范围不超过 7 nm；反射谱的宽度几乎随刻槽深度呈现出正比例变化；反射谱的最大反射率逐渐升高达到平稳，在刻槽深度为 120～240 nm 范围内，其数值几乎都接近 100%。



（a） 反射谱的中心波长 （b） 反射谱半高宽 （c） 最大反射率

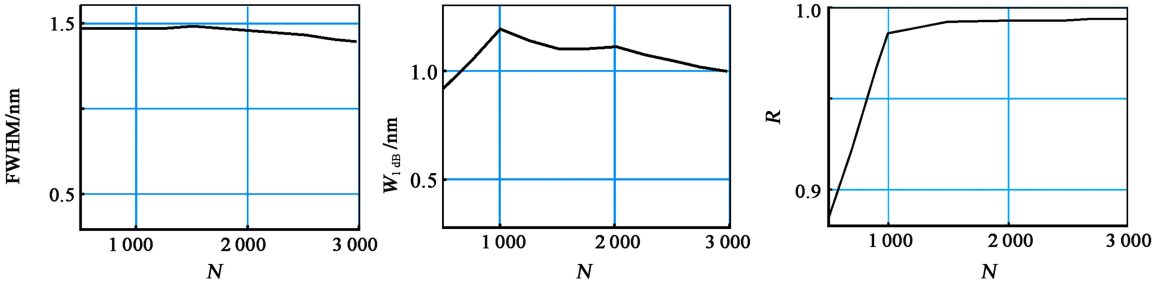
图 6 刻槽深度对器件光学特性的影响

光栅周期数量(N)对于布拉格光栅的光学性能也有着重要影响。光栅周期数量决定了介质分界面的数量,进而影响传输光能够获取的反射路径长度。随着周期数量的增多,反射效率会得到提升,能够被完全反射回入射端的波长数量也会增多,致使反射谱发生延展,旁瓣数量增大,如图 7 所示。当周期数量增大到一定时,反射谱的峰值和宽度等光学特征都将趋于饱和,如图 8 所示。反射谱宽度随周期数量的变化不明显,其波动范围基本在 0.2 nm 左右。在周期数量较少时,反射谱的峰值几乎随周期数量成正比例变化,说明达到饱和之前的反射谱峰值强烈受控于周期数量。随着周期数量的增大,反射谱的峰值逐渐趋于饱和,几乎达到完全反射。



(a)　$N=500$　　(b)　$N=1\,000$　　(c)　$N=1\,500$　　(d)　$N=2\,000$

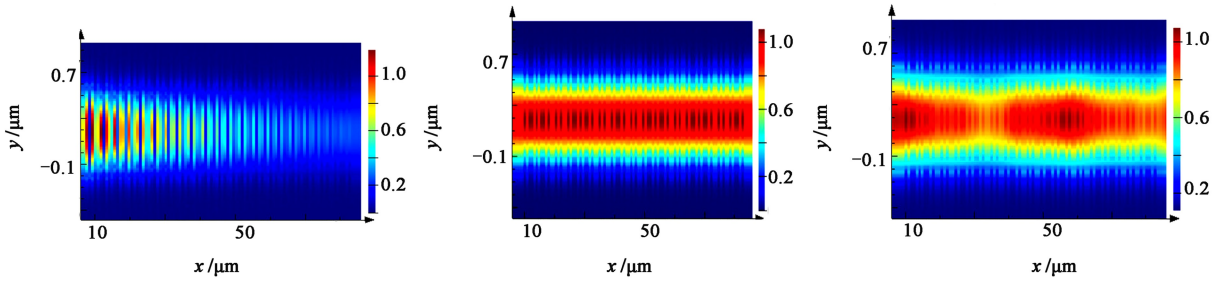
图 7　不同周期数量对应的布拉格光栅反射谱



(a)　反射谱半高宽　　(b)　反射谱的 1 dB 带宽　　(c)　最大反射率

图 8　周期数量对器件光学特性的影响

综合以上各种因素,设计得到布拉格光栅结构 RGB 波导解复用器,其宽度为 500 nm,刻槽深度为 125 nm,一个周期尺寸为 185 nm,占空比为 0.5,总共有 480个周期,器件总长度为 88.8 μm,实现了 550 nm 绿光的解复用功能,如图 9 所示。光谱左端的 450 nm 蓝光与右端的 630 nm 红光的透过率良好,光谱中间的 550 nm 绿光的反射效率较高,几乎完全反射回入射端口。



(a)　绿光(G)　　(b)　红光(R)　　(c)　蓝光(B)

图 9　RGB 解复用器的轴向传输光场

3　结论

本文描述了布拉格光栅结构 RGB 波导复用/解复用的光学机理,并且较为系统地研究了所构成的 RGB 波导复用/解复用器的光学特性。采用石英基-SU8 材料设计的 RGB 波导复用/解复用器,其横截面只有几百纳米,长度仅为几十微米,表现出了良好的紧凑性。研究表明,光栅的刻槽深度与周期数量对于其光学特性有着重要影响。光栅刻槽深度的变化会导致反射谱的宽度发生变化,位置发生移动,

峰值发生波动。当周期数量较小时，随着周期数量的增大，反射效率得到提升，反射谱的宽度发生延展，旁瓣数量增大。随着周期数量的进一步增多，反射谱的峰值和宽度都将趋于饱和。基于这些特性，设计了针对 450 nm 蓝光、550 nm 绿光、630 nm 红光的布拉格光栅结构 RGB 复用/解复用器，实现了 RGB 复用和解复用的功能。

参考文献：

[1] Niffenegger R J, Stuart J, Sorace-Agaskar C, et al. Integrated multi-wavelength control of an ion qubit[J]. Nature, 2020, 586: 538-542.

[2] Shi L, Li B, Kim C, et al. Towards real-time photorealistic 3D holography with deep neural networks[J]. Nature, 2021, 591: 234-239.

[3] Ikuta R, Kusaka Y, Kitano T, et al. Wide-band quantum interface for visible-to-telecommunication wavelength conversion[J]. Nature Communications, 2011, 2: 537.

[4] An Jinyoung, Pham Quan Ngoc, Chung Wan-Young. Single cell three-channel wavelength division multiplexing in visible light communication[J]. Opt. Express, 2017, 25: 25477-25485.

[5] Hernández-Neuta I, Neumann F, Brightmeyer J, et al. Smartphone-based clinical diagnostics: towards democratization of evidence—based health care[J]. J. Intern. Med., 2019, 285: 19-39.

[6] Li Lan, Lin Hongtao, Qiao Shutao, et al. Monolithically integrated stretchable photonics[J]. Light Science & Applications, 2018, 7(2): 17138.

[7] Li Lan, Lin Hongtao, Qiao Shutao, et al. Integrated flexible chalcogenide glass photonic devices[J]. Nature Photonics, 2014, 8(8): 643-649.

[8] Wang Cong, Wang Ding, Kozhevnikov V, et al. A flexible topo-optical sensing technology with ultra-high contrast[J]. Nature Communications, 2020, 11: 1448.

[9] Li Lan, Lin Hongtao, Huang Yizhong, et al. High-performance flexible waveguide-integrated photodetectors[J]. Optica, 2018, 5(1): 44-51.

[10] Katsuyama T, Nakao A, Ogawa K, et al. Extremely small red-green-blue beam combiners for compact projection-type displays[J]. Proc. of SPIE, 2014, 9272: 927203.

[11] Nakao A, Morimoto R, Kato Y, et al. Integrated waveguide-type red-green-blue beam combiners for compact projection-type displays[J]. Opt. Commun., 2014, 330: 45-48.

[12] Sakamoto J, Goh T, Katayose S, et al. Compact and low-loss RGB coupler using mode-conversion waveguides[J]. Opt. Commun., 2018, 420: 46-51.

[13] Cheben P, Halir R, Schmid J H, et al. Subwavelength integrated photonics[J]. Nature, 2018, 560: 565-572.

[14] Zhang Weifeng, Yao Jianping. A fully reconfigurable waveguide Bragg grating for programmable photonic signal processing[J]. Nature Communications, 2018, 9: 1396.

[15] 尹小杰，郑之远，訾幸壮，等. 基于 Y 型分支与布拉格光栅结构的集成光芯片研究[J]. 光子学报，2021，50(5)：0513002.
Yin Xiaojie, Zheng Zhiyuan, Zi Xingzhuang, et al. Integrated optical chip based on Y-branch and Bragg grating structure[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5): 0513002.

[16] Tal Weiss, Yonatan Sivan. Stopping light using a transient Bragg grating[J]. Phys. Rev. A, 2020, 101: 033828.

[17] 蒲明博，王长涛，王彦钦，等. 衍射极限尺度下的亚波长电磁学[J]. 物理学报，2017，66(14)：144101.
Pu Mingbo, Wang Changtao, Wang Yanqin, et al. Subwavelength electromagnetics below the diffraction limit[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(14): 144101.

[18] 刘 影，崔 杰，姚国政，等. 亚波长浮雕光栅的衍射和抗反射及增透研究[J]. 光学学报，2016，36(2)：0205001.
Liu Ying, Cui Jie, Yao Guozheng, et al. Study on diffraction, anti-reflection and transmission enhancement of subwavelength relief gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0205001.

[19] Kung Y C, Hosseini N, Dumcenco D, et al. Air and water-stable n-type doping and encapsulation of flexible MoS_2 devices with SU8[J]. Adv. Electronic Materials, 2018, 5(1): 1800492.

[20] Jin Lin, Fu Xin, Shi Yaocheng, et al. Optical bistability in a high-*Q* racetrack resonator based on small SU-8 ridge waveguides[J]. Opt. Lett., 2013, 38(12): 2134-2136.

[21] Matarèse B F E, Feyen P L C, Falco A, et al. Use of SU8 as a stable and biocompatible adhesion layer for gold bioelectrodes[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 5560.

[22] Chen Zhi, Wang Guande, Wang Xiong. Physical mechanism and response characteristics of unsaturated optical stopping-based amorphous arsenic sulfide thin-film waveguides[J]. IEEE Photonics J., 2019, 11(1): 6100910.

[23] Chen Zhi, Wang Guande, Wang Xiong, et al. Moving toward optoelectronic logic circuits for visible light: a chalcogenide glass single-mode single-polarization optical waveguide switch[J]. Appl. Optics, 2017, 56(5): 1405-1412.

[24] 陈 直，许 良，陈荣昌，等. Kinoform 单透镜的硬 X 射线聚焦性能[J]. 物理学报，2015，64(16)：164104.
Chen Zhi, Xu Liang, Chen Rongchang, et al. Focusing performance of hard X-ray single Kinoform lens[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(16): 164104.

作者简介：

陈 直(1982—)，男，吉林省梨树县人，2015 年博士毕业于中国科学院上海应用物理研究所，2015～2018 年于中国科学院上海微系统与信息技术研究所进行博士后研究，助理研究员，主要研究方向为光波导与集成光学。