

激光与光电子学进展

蓝绿波分复用技术研究进展(特邀)

孙彩明, 张爱东*

香港中文大学(深圳)人工智能与机器人研究院, 广东 深圳 518172

摘要 波分复用技术已被证明可以有效提高近红外波段光通信的容量,并减小通道间串扰。然而,迄今为止,蓝绿光波段的波分复用系统仅支持有限数量的波长通道,通道间隔较大。这是因为没有适用于可见光的具有精细波长间隔的波分复用器和解复用器。为了阐述清楚这一问题,本文综述可见光波段波分复用技术的发展,特别关注基于集成光学相控阵解复用器的密集蓝绿波分复用技术的进展。最后,对目前蓝绿波分复用技术的发展趋势进行了总结和展望。

关键词 波分复用; 可见光通信; 蓝绿光通信; 光学相控阵; 解复用器

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP240714

Review of Blue-Green Wavelength Division Multiplexing Technology (Invited)

Sun Caiming, Zhang Aidong*

Shenzhen Institute of Artificial Intelligence and Robotics for Society, The Chinese University of Hong Kong,
Shenzhen 518172, Guangdong, China

Abstract Wavelength division multiplexing (WDM) technology has been shown to effectively increase the capacity of optical communications with minimal channel crosstalk in the near-infrared light band. However, to date, WDM systems in the blue-green band support a limited number of wavelength channels with coarse channel spacing. This is because no multi/demultiplexers (MUX/DeMUX) exist that use fine wavelength spacing for visible light. To clarify this issue, this study reviews the development of WDM in the visible band and discusses the recent development of dense blue-green WDM based on integrated optical phased array DeMUX. Finally, the study summarizes and prospects the development trends of blue-green WDM.

Key words wavelength division multiplexing; visible light communication; blue-green light communication; optical phased array; demultiplexer

1 引言

无线光通信(OWC)因其能够有效解决射频(RF)通信遇到的数据瓶颈问题而备受关注^[1-2]。无线通信领域的电磁频谱资源已变得极为紧张。然而,光频段作为电磁频谱的一部分,不仅无需授权使用,而且到目前为止基本上还未被开发利用。因此,光频段为射频通信提供了额外的频率带宽,以作为补充。未来6G的覆盖范围将进一步扩充至偏远地区、水面、水下、空中,乃至卫星中^[3-4],这些场景的环境差异巨大,这意味着6G网络将不再是一个使用单一通信手段的通信网络,只有融合各种无线通信方法,才能发挥其各自优势^[5-6]。尤其是水下无线通信,由于蓝绿光在海水中有一个相对低衰减的通光窗口(450~550 nm)^[7-8],水下蓝绿光通信凭借着高速率、低延时的优势可发挥巨大作用。波分复用(WDM)技术因其能够显著增加通信容量,同时最大程度地减少通道间的串扰,因而成为扩充OWC容量的首选技术,并得到了广泛的应用^[9-10]。在成熟的光纤通信系统中早已完成WDM的广泛部署,密集波分复用(DWDM)的通道间隔小于0.8 nm^[11]。WDM还应用于采用DWDM通道间隔的自由空间光通信(FSO)^[12-13]和可见光通信(VLC)系统^[14-15]。FSO-WDM利用成熟的近红外光通信波段,并在通信频段内采用DWDM窄通道间隔,可提供超高通信速率(>1 Tbit/s)^[12]。相比之下,蓝绿光波段的WDM系统通常使用非常稀疏的波长通道,通道间隔较大,从而限

收稿日期: 2024-01-08; 修回日期: 2024-02-27; 录用日期: 2024-03-07; 网络首发日期: 2024-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(62175120)、广东省基础和应用基础研究基金(2021B1515120084)、深圳市科技计划资助(JCYJ20220818103011023)

通信作者: *zhangaidong@cuhk.edu.cn

制了可用波长通道的数量^[9-10,14-16]。这一问题的部分原因在于,目前缺乏针对蓝绿光波段的具有精细波长间隔的波分复用器/解复用器(MUX/DeMUX)。

集成光栅技术已经广泛用于硅光子集成系统的光学天线^[17-18],基于一维(1D)波导表面光栅阵列的光学相控阵(OPA)可以实现有效的波长分离^[19-21]。受益于光栅的色散特性,很宽范围的各种波长的光在三维空间可以被偏转到不同的角度。早在 1997 年,第一个基于绝缘体上硅(SOI)波导技术的相控阵波长复用器就被报道了^[22]。一维阵列波导光栅(AWG)已广泛用于光纤通信系统中的波分复用器/解复用器^[23]。从而,基于一维光栅阵列的 OPA 对于实现无线光通信系统中的 MUX/DeMUX 具有明显的优点。近年来随着 OPA 的工作波长从通信波段扩展到可见光波段^[24-29],其应用范围也已经从激光雷达(LiDAR)扩展到了无线光通信、投影、3D 成像、3D 全息显示等新颖领域^[30-31]。得益于蓝绿相控阵技术的发展^[25-27],基于一维光栅阵列也已经可以实现具有精细波长间隔的蓝绿波分复用器和解复用器。

2 蓝绿波分复用基本原理

蓝绿波分复用工作原理如图 1 所示。无线光通信

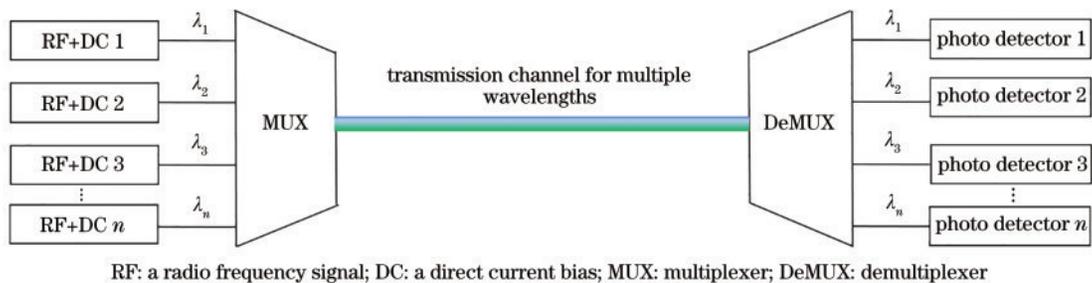


图 1 蓝绿波分复用工作原理图

Fig. 1 Experimental setup for blue-green WDM

3 可见光通信波分复用的实现方式

基于上面 WDM 工作原理,科研人员已经在可见光波段通过 WDM 技术实现了通信容量的倍增。浙江大学^[14]展示了一种红(R)、绿(G)、蓝(B)三色复用的水下无线光通信(UWOC)系统,如图 2 所示。在发射端,该系统采用 RGB 三色激光二极管(LD)发射光,波长分别为 660 nm、520 nm、440 nm,RGB 三色光准直后,耦合进入空间合束器形成一束复合光束,随后此光束经过同一传输通道在水中传输 10 m。3 个 RGB 复用通道均采用了 32-正交幅度调制(32-QAM)正交频分复用(OFDM)技术。在接收端,采用不同的光学滤波片,对 RGB 三色进行分光,实现 RGB 的解复用。通过 RGB 三色复用技术获得了 9.51 Gbit/s 的总通信速率,其中,RGB 通道的通信速率分别为 4.17 Gbit/s、4.17 Gbit/s、1.17 Gbit/s。RGB 三通道相应的误码率(BER)分别为 2.2×10^{-3} 、 2.0×10^{-3} 、 2.3×10^{-3} ,均远

通常在发射端按照一定的通信协议对通信数据进行处理。所得到的通信数据通常由直流偏置(DC)和调制信号(RF)叠加而成,生成多个调制光信号:RF+DC 1, RF+DC 2, RF+DC 3, ..., RF+DC n。这些调制光信号与 WDM 的光波通信信道一一对应,所有信道的光信号通过扩束器和准直器发射到自由空间。在信号传输过程中所有 WDM 信道共用同一个传输通道,将光束发送至对应的接收端。接收端通过解复用器对不同波长的光束进行分光,并耦合进相应的光探测器。不同信道的探测器将光信号转换为电信号,通过放大和解码后,获得相应信道的通信数据。WDM 技术提高了发送端和接收端之间的通信带宽,实现通信容量倍增,并使用扩束器和准直器对由调制光波构成的光束进行处理,提高了光束的通信距离。蓝绿 WDM 通常将不同波长的光信号进行合束来实现多路复用,合束后的复合光束共用同一个传输通道,在接收端通过分光来实现不同波长信道的解复用。分光通常由窄带滤波器或衍射光栅来实现,分光的效率对于 WDM 通道间最小波长间隔及降低通道间串扰起决定性作用。这样一个合适的分光器件就是实现密集蓝绿波分复用的关键因素之一。

低于前向纠错(FEC)的硬判决门限(3.8×10^{-3})。另外,基于波长和偏振复用原理的可见光通信系统也已被报道^[15],如图 3 所示。在发射端,波长分别为 642.6 nm、520.4 nm、450.6 nm 的 RGB 三色光通过透射光栅实现合束,经过准直器后发射到自由空间,在空气中传输 20 m。50 Gbit/s 的四电平脉冲幅度调制(PAM4)分别加载到各个 WDM 通道上,3 个波长叠加两个偏振(p-偏振、s-偏振)产生总共 6 个 WDM 通道在自由空间实现了并行传输。在接收端,通过透射光栅对 3 个波长进行分光,实现不同通道的解复用。此系统通过 3 个波长叠加两个偏振的复用方式实现了 300 Gbit/s 的总通信速率。

进一步地,5 个波长叠加 2 个偏振产生总共 10 个 WDM 通道实现了 100 m FSO 和 10 m-清水/5 m-浑水 UWOC^[16],如图 4 所示。在发射端,5 个波长 450.6 nm、488.2 nm、520.4 nm、642.6 nm、660.3 nm 的光通过光纤合束器实现合束,经过准直器后发射到自由空间,在

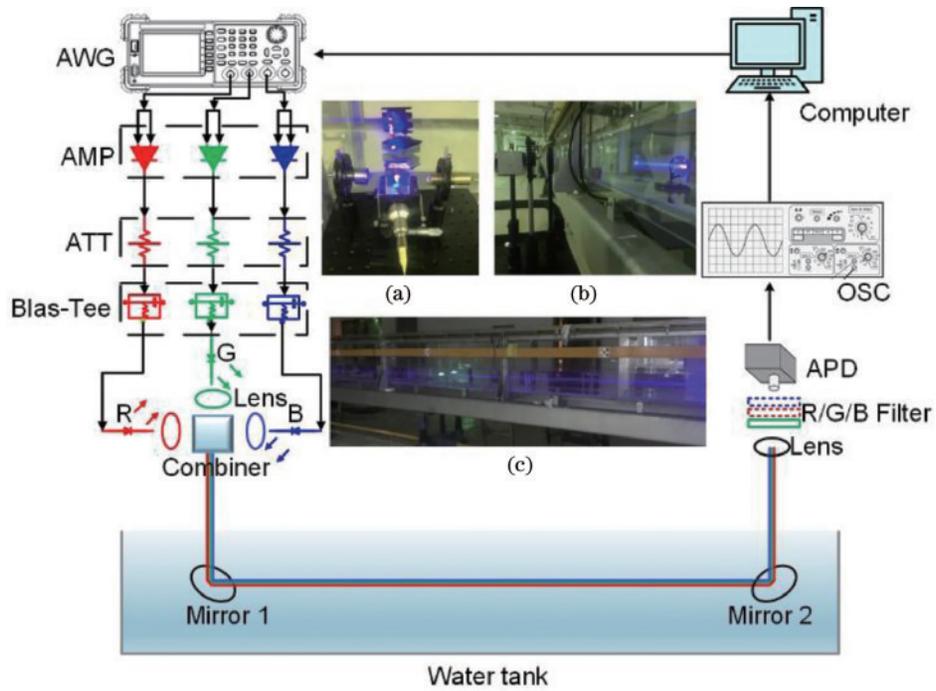


图 2 RGB 三色复用水下无线光通信系统实验装置图^[14]。(a) 发射端；(b) 接收端；(c) 水槽

Fig. 2 The experimental setup of the proposed RGB LDs-based WDM UWOC system^[14]. (a) The transmitter module; (b) the receiver module; (c) the water tank

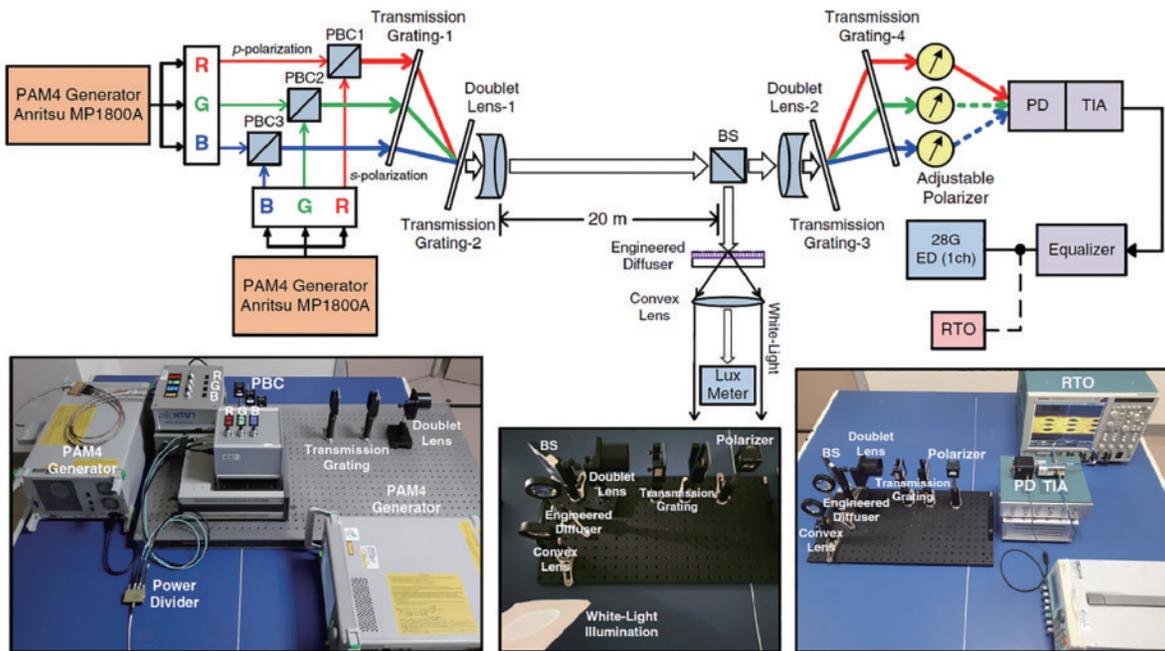


图 3 采用透射光栅作为复用器/解复用器的波分复用-可见光通信系统实验装置图^[15]

Fig. 3 The experimental setup of the proposed WDM-VLC system using transmission gratings as MUX/DeMUX^[15]

空气中传输 100 m。蓝绿波长 (450.6 nm、488.2 nm、520.4 nm) 的光经过低衰减的清水传输 10 m, 红色光 (642.6 nm、660.3 nm) 经过浑浊的水传输 5 m。

在接收端, 通过窄带滤波器对 5 个波长进行分光, 再配合偏振分析器, 10 个通道得以解复用。图 5 是通过滤波和偏振分析实现解复用的原理示意图, 展示了对应 5 个中心波长的滤波器透射谱。50 Gbit/s 的 PAM4 调制信号分别加载到 10 个 WDM 通道上, 此系

统通过 5 个波长叠加 2 个偏振的复用方式实现了 500 Gbit/s 的总通信速率。

可以看到, 尽管在上面这些报道可通过可见光 WDM 来提高通信速度, 但迄今为止, 可见光波段的 WDM 通道仍非常稀疏, 限制了通道数量和利用效率。目前窄带滤波器和传统衍射光栅很难实现纳米级波长间隔的分光, 具有精细波长分辨率的解复用器成为解决此问题的关键要素。

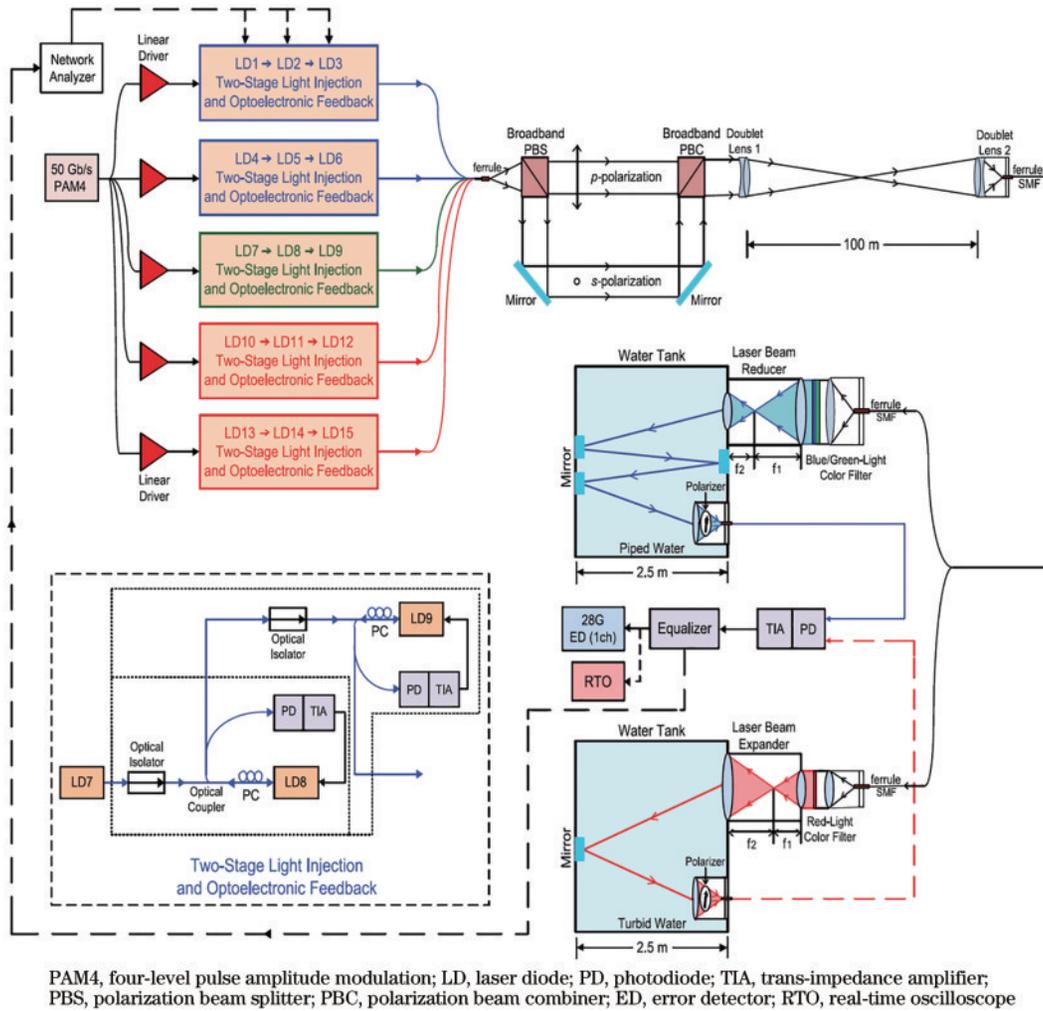


图 4 基于 RGB 5 波长偏振混合复用的可见光通信系统架构图^[16]

Fig. 4 The configuration of illustrated VLC system with a R/G/B five-wavelength polarization-multiplexing scheme^[16]

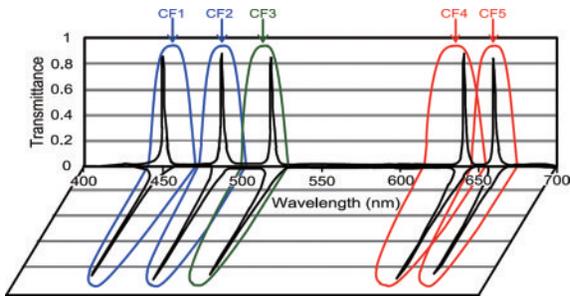


图 5 通过滤波和偏振分析实现解复用的原理图^[16]

Fig. 5 Schematic diagram of demultiplexing achieved through filtering and polarization analysis^[16]

4 基于集成光学相控阵的蓝绿波分复用技术

为了实现纳米级波长间隔的分光,香港中文大学(深圳)基于硅光子集成工艺成功开发出了蓝绿波段 OPA 集成光栅阵列^[32-33]。基于高对比度光栅(HCG)孔径的蓝绿光相控阵成功实现了蓝绿波段最小 4 nm 的 WDM 通道间隔^[32,34],进一步地,通过偏振敏感的一维光栅阵列 OPA 对波长间隔 1.2 nm 的 WDM 通道进

行了有效的分光^[33]。

4.1 基于 HCG 的蓝绿光解复用器

图 6(a)为具有 HCG 孔径的蓝绿光相控阵布局的示意图^[32]。该 HCG 孔径的孔径尺寸为 $96 \mu\text{m} \times 105 \mu\text{m}$,由光栅周期为 $1.5 \mu\text{m}$ 、波导宽度为 $0.55 \mu\text{m}$ 的氮化硅(SiN_x)条形波导光栅组成。该器件包括 1 个倒锥形端面耦合器、1 个 6 级多模干涉仪(MMI)分光器树、沿 x 方向与 MMI 相连接的 64 个条状波导通道,以及 1 个 HCG 孔径。其中,氮化硅层厚度是 300 nm。图 6(b)展示了 HCG 和典型鱼骨光栅天线^[26]沿光传播方向的有效折射率(n_{eff})。可以发现,与鱼骨天线相比,HCG 在每个周期 Λ 中表现出更大的 n_{eff} 对比度。波长从 492 nm 到 522 nm 的蓝绿光被 MMI 分束后均匀耦合进条状波导阵列,并均匀地照射 HCG 孔径。当绿色激光耦合到该器件时,图 6(c)、(d)是相机在显微镜下捕获的器件近场图像。当开启显微镜的辅助照明灯时,图 6(c)清晰地展现了端面耦合器、6 级 MMI 分光器树、条状波导区域、薄膜波导区域和 HCG 孔径。当辅助照明灯关闭时,除了条状波导区域之外的所有区域都被绿光点亮,如图 6(d)所示。薄膜波导区域和

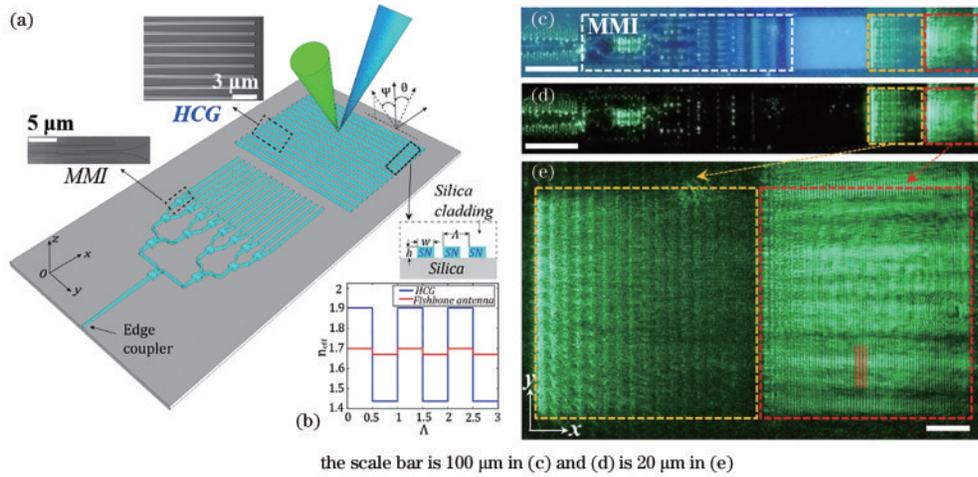


图 6 (a) 基于 HCG 孔径的蓝绿光相控阵示意图; (b) 在 xz 截面内沿着光传输方向有效折射系数分布; (c) 开辅助照明灯时显微镜下拍的器件照片; (d) 关闭辅助照明灯时显微镜下拍的器件照片; (e) 器件薄膜波导区域和 HCG 孔径区域的高分辨照片^[32]

Fig. 6 (a) Schematic diagram of a blue-green light phased array based on HCG aperture; (b) distribution of the effective refractive index along the light propagation direction in the xz cross-section; (c) microscope image of the device taken with auxiliary illumination turned on; (d) microscope image of the device taken with auxiliary illumination turned off; (e) high-resolution photograph of the device's thin-film waveguide area and HCG aperture area^[32]

HCG 孔径分别由橙色和红色虚线方框表示。由于光通过 MMI 分光器树以等相位在 64 个波导中均匀分布, 因此 64 束光束相干耦合到具有二氧化硅/SiN_x/二氧化硅堆叠结构的薄膜波导中。光在薄膜波导(橙色虚线方框)中传播约 100 μm 后, 绿光均匀照射在 HCG 孔径(红色虚线方框)上。然后, 薄膜波导区域和 HCG 孔径区域的近场图像通过用于 OPA 辐射表征的高分辨率成像装置捕获, 如文献[35-37]中所述。图 6(e) 分别放大了图 6(d) 中的橙色和红色虚线方框所标示区域, 显示了薄膜波导区域和 HCG 孔径区域的特写视图。在这张高分辨率图像中可以清楚地观察到 HCG

中的 64 个波导, 如图 6(e) 中的红色实线所示, 这与图 6(a) 中电子显微镜(SEM)下观察到的波导是一致的。输入光束没有任何延迟地通过 HCG 孔径均匀有效地散射到自由空间。对于 OPA 来说, 让所有光束以所需的幅度和相位分布发射(此处是均匀的)以在远场提供理想的干涉条件至关重要。

HCG 孔径的远场辐射光斑可以表征为天线阵列散射的多光束干涉图样与来自单个天线的衍射图样的叠加。图 7(a) 给出了 520 nm 光激发的 HCG 孔径远场图的 3D FDTD 仿真计算结果。主瓣沿 θ 方向投射在 51.1° 处的光束具有最高强度, 以绿色矩形表示, 而分别

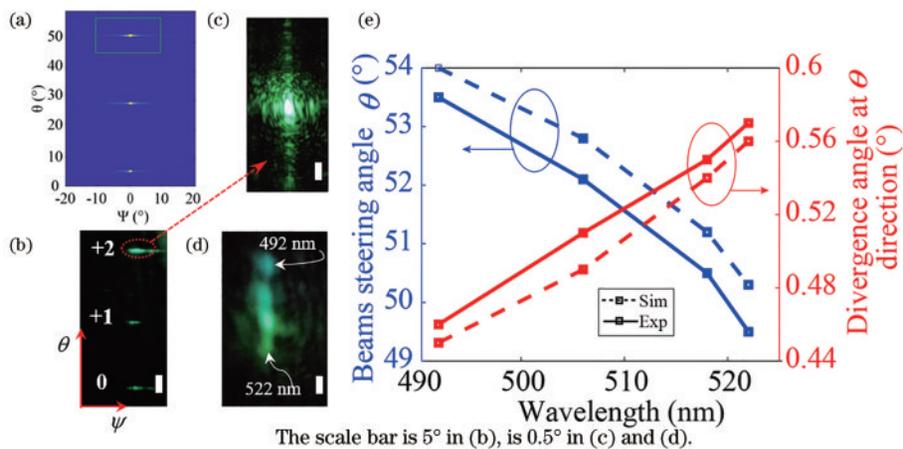


图 7 (a) 仿真计算的 HCG 孔径远场光斑; (b) 实验测量的 HCG 孔径远场光斑; (c) 主斑的高分辨照片; (d) 492 nm、506 nm、518 nm、522 nm 等 4 个波长同时激发的 4 个主斑高分辨照片; (e) 对应 492 nm、506 nm、518 nm、522 nm 等 4 个波长的主斑偏转角和发散角^[32]

Fig. 7 (a) Simulated far-field light spot of the HCG aperture; (b) experimentally measured far-field light spot of the HCG aperture; (c) high-resolution photograph of the main lobe; (d) high-resolution photograph of the four main lobes excited simultaneously at four wavelengths: 492 nm, 506 nm, 518 nm, and 522 nm; (e) the deflection angles and divergence angles of the main lobes corresponding to the four wavelengths of 492 nm, 506 nm, 518 nm, and 522 nm^[32]

位于 5° 和 25.7° 处的 0 阶和 +1 阶光栅瓣的光束较弱。主瓣设计在 $\sim 50^\circ$ 处, 是作为具有最大衍射强度的 +2 阶光栅瓣。这是为了解耦正向和反向传播光的强共振, 并防止在垂直方向附近出现光传输禁带的现象^[26-28]。

实验测量的 520 nm 光的远场图如图 7(b) 所示, 记录了主瓣(+2 阶)和 0 阶/+1 阶光栅瓣。实验测得的 +2 阶主瓣为 50.8° , 而 +1 阶/0 阶栅瓣分别为 25.1° 和 5.2° 。图 7(b) 中实验测量的远场图与图 7(a) 中仿真计算的远场图一致。每个光斑沿 ψ 方向都有明显的条纹, 这被认为来自单个天线的夫琅和费衍射。在 64 通道 OPA 的制造过程中, 工艺偏差是不可避免的, 这会导致沿 ψ 方向的相位失配。相位误差将破坏光束合束并引起沿 ψ 方向的额外光束发散。 ψ 方向的衍射行为不会影响 HCG 沿 θ 方向的波长分离。栅瓣的位置也可以通过以下方程计算:

$$\psi' = \pm \arcsin(\lambda/\Lambda), \quad (1)$$

式中: λ 为工作波长; Λ 为光栅周期。实验和仿真计算的远场光斑位置与理论计算一致。

采用高分辨率远场测量系统^[35]进一步观测主瓣光斑, 如图 7(c) 所示, 它是图 7(b) 所示主瓣的放大后的

高分辨图像。然后, 492 nm、506 nm、518 nm 和 522 nm 等 4 个波长同时激发到 OPA 上, 相应的 4 个远场主斑光斑如图 7(d) 所示, 4 个光斑成功分束。图 7(e) 描绘了实验测量和仿真计算的主瓣位置与 492 nm、506 nm、518 nm 和 522 nm 的输入光波长的关系。492 nm、506 nm、518 nm、522 nm 波长光束发散角的实验结果与仿真结果一致, 如图 7(e) 右轴所示。对于 492 nm、506 nm、518 nm 和 522 nm 波长通道, 实验测得的偏转角分别为 53.5° 、 52.1° 、 50.5° 和 49.5° , 相应的发散角分别为 0.46° 、 0.51° 、 0.55° 和 0.57° 。相邻通道之间的间隔角度为 1.4° 、 1.6° 和 1° 。可以发现, 这些间隔角大于两个相邻波长通道中主瓣的发散角。因此, 这 4 个波长可以被 HCG 成功分离, 如图 7(d) 所示。

以上面高效蓝绿光 HCG 相控阵作为解复用器, 搭建了如图 8 所示的 WDM 系统^[32]。该工作提出并通过实验证明了具有 492 nm、506 nm、518 nm、522 nm 等 4 个波长通道的 WDM 系统。其中, 4×1 耦合器设计为 MUX、OPA 设计为 DeMUX。开关键控 (OOK) 调制在 BER 为 2.0×10^{-2} (SD-FEC 阈值) 时实现了 3.5 Gbit/s 的总通信速率, 通道间隔缩小至 4 nm^[34]。

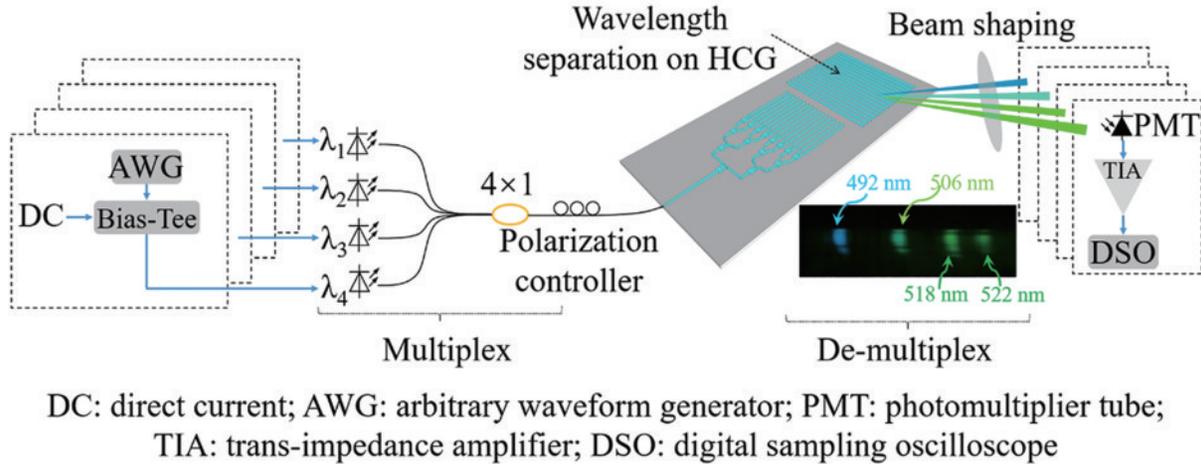


图 8 以 HCG 蓝绿相控阵作为解复用器的 WDM 概念验证系统实验装置图^[32]

Fig. 8 The experimental setup of blue-green light phased array with HCG as a demultiplexer in a proof-of-concept demonstration of WDM system^[32]

为了进一步提升通信速率, 8-QAM OFDM 调制被应用在 506 nm 和 518 nm 的两个通道上, 获得了 4.5 Gbit/s 的总通信速率, 各 WDM 通道的参数和通信性能如表 1 所示。

表 1 WDM 通道参数和性能^[34]

Table 1 WDM channel parameters and performance^[34]

Channel	DC bias voltage / V	Data rate / (Gbit/s)	BER	ROP P_r / nW
492 nm	6.0	0.6	1.09×10^{-2}	140
506 nm	5.9	2.0	2.00×10^{-2}	712
518 nm	6.0	1.0	5.30×10^{-3}	316
522 nm	7.4	0.9	1.50×10^{-2}	239

4.2 基于一维光栅阵列的蓝绿光解复用器

这里的一维光栅由鱼骨型天线构成, 图 9(a) 展示了鱼骨型天线 OPA 光子芯片的布局示意图^[33]。该光子芯片包括 1 个倒锥形端面耦合器、1 个 6 级 MMI 分光器树和天线孔径。OPA 天线孔径包括沿 x 方向与 MMI 相连接的 64 通道鱼骨型波导阵列。其中, 氮化硅层厚度是 150 nm。

鱼骨型天线设计为沿 x 方向具有周期性扰动的一维波导光栅, 如图 9(b) 所示。该天线波导高度 h 为 150 nm, 无扰动波导宽度 W 为 340 nm。一个周期内, 扰动波导和未扰动波导沿 x 方向的长度均为 300 nm。将扰动周期 Λ 设置为约 600 nm, 则蓝绿波段主瓣的偏

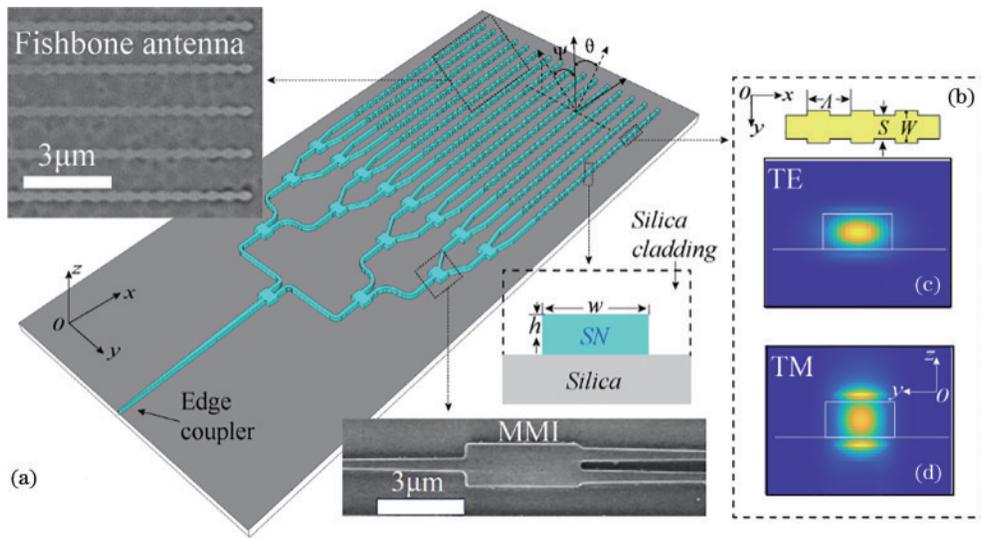


图 9 (a) 基于鱼骨型天线结构的氮化硅蓝绿光相控阵光子芯片示意图; (b) 在 xy 截面内单根鱼骨型天线的结构图; (c) 在 yz 截面内单根天线 TE 模电场分布图; (d) 在 yz 截面内单根天线 TM 模电场分布图^[33]

Fig. 9 (a) Schematic diagram of a silicon nitride photonic chip with a phased array based on a fishbone-type antenna structure; (b) structural diagram of a single fishbone-type antenna in the xy cross-section; (c) distribution of the TE mode electric field for a single antenna in the yz cross-section; (d) distribution of the TM mode electric field for a single antenna in the yz cross-section^[33]

转角在 50° 左右^[21]。图 9(c)、d) 显示了鱼骨型波导在 yz 横截面上 TE 和 TM 模式的电场分布。可以发现, TM 模式在波导外部沿 z 方向的电场大于 TE 模式, 该天线的远场辐射具有偏振敏感的特性。TM 模式在 520.5 nm 波长处的有效折射率低于 TE (TE 和 TM 模式的有效折射率分别为 1.68 和 1.62)。这两种模式的波矢非简并性源于所设计的鱼骨型波导在 yz 平面内旋转对称性破缺, 这将导致同一波长激发的远场主瓣分离, 从而实现模式复用。

基于鱼骨型天线的 OPA 芯片在 xy 平面上的结构图如图 10(a) 所示。可以看到, 端面耦合器、6 级 MMI 分光器树和波导天线区域均被清楚地识别出来。当绿色激光耦合到芯片时, 在暗场中观察近场图像, 如图 10(b) 所示。入射光经 MMI 分光器树后等相位均匀地进入 64 个鱼骨型波导中。可以看出, 基于此鱼骨型天线的设计, 天线区域被均匀地照亮。输入光束将被鱼骨型波导阵列均匀有效地散射到自由空间。实验观测到的 520.5 nm 光的 TE 和 TM 模式的远场图如图 10(c) 所示, 相机记录了主瓣和 ± 1 阶光栅瓣。它们的主瓣偏转角沿 θ 方向分别为 55° 和 49.5° , 沿 ψ 方向为 0° , 测得的 θ 方向发散角为 0.52° 和 0.49° 。两种模式的 ± 1 栅瓣沿 θ 方向的偏转角均高于主瓣, 分别为 59° 和 52.5° , 沿 ψ 方向的偏转角分别为 $\pm 23^\circ$ 。光栅瓣在 ψ 方向的偏转角与式 (1) 的理论值吻合得很好。图 10(c) 还给出了 TE 和 TM 模式主瓣的放大图, 可以看出, 两种模式在空间上彼此分离得很好。

研究不同波长 TE 和 TM 模式的蓝绿波段光束偏转特性对于基于 OPA 的 WDM-VLC 应用非常重要。图 11(a) 显示了波长为 494 nm 、 508 nm 、 520.5 nm 、

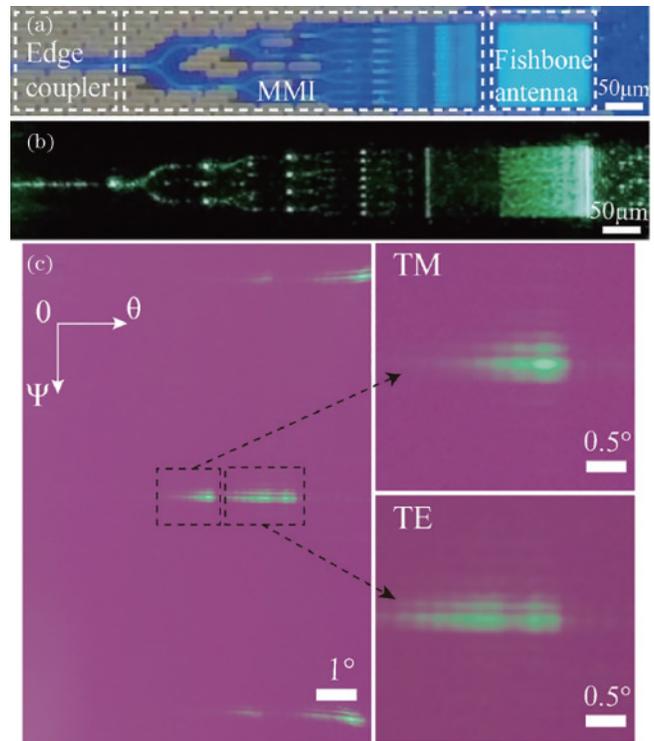


图 10 (a) 基于鱼骨型天线结构的 OPA 芯片显微图像; (b) 520.5 nm 激光激发的 OPA 芯片近场图; (c) 520.5 nm 激光激发的 OPA 远场光斑^[33]

Fig. 10 (a) The microscopy images of the fabricated OPA chip based on fishbone waveguide antenna; (b) near-field field excited by the 520.5 nm laser captured by image camera; (c) measured TE mode and TM mode far-field patterns of the OPA excited by the 520.5 nm laser^[33]

521.7 nm 的 4 个 LD 的实验光谱。4 个波长经 OPA 分光后得到的远场主瓣光斑如图 12 所示。图 11(b) 是以

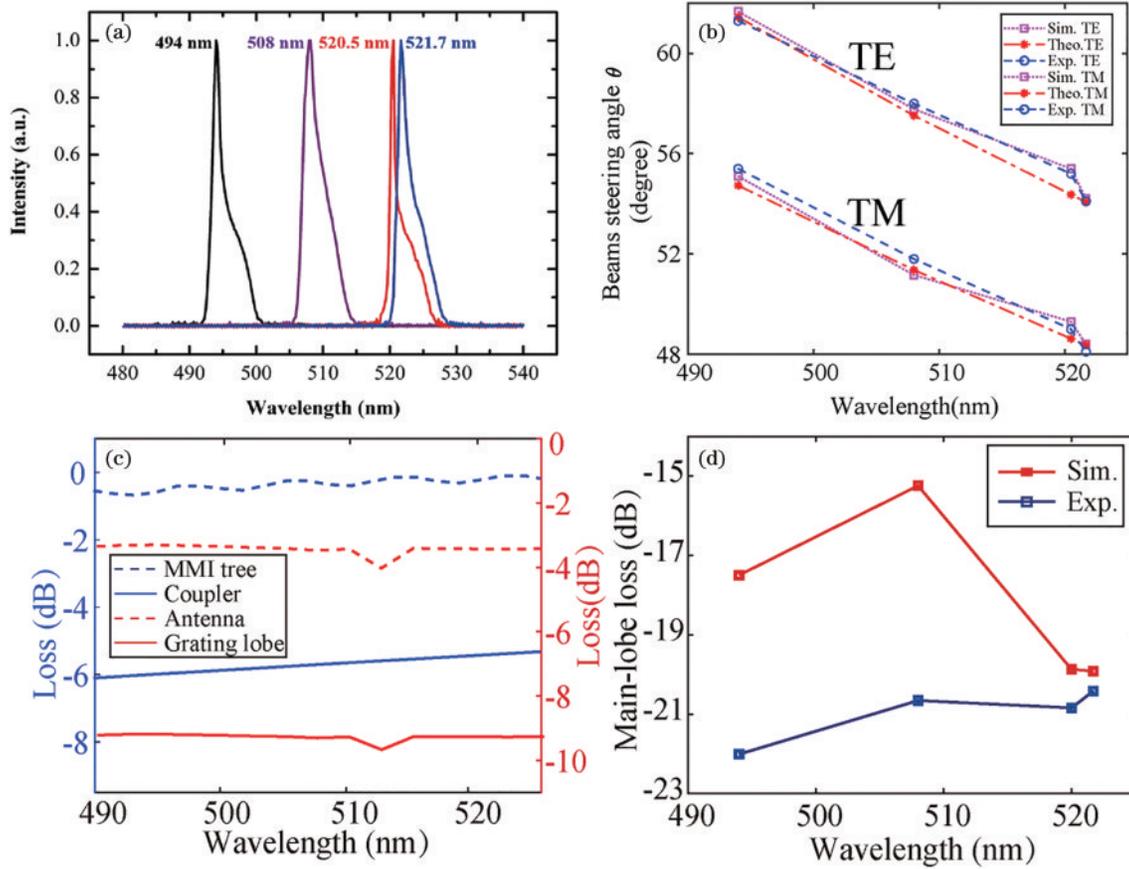


图 11 (a) 波长为 494 nm、508 nm、520.5 nm、521.7 nm 的 4 个 LD 的实验光谱;(b) 以上 4 个波长激发的 TE 和 TM 模式主瓣偏转角的仿真、实验和理论结果;(c) OPA 芯片光损耗的仿真计算结果;(d) 以上 4 个波长的主斑损耗的仿真和实验结果^[33]

Fig. 11 (a) Experimental spectra of four LD with wavelengths of 494 nm, 508 nm, 520.5 nm, and 521.7 nm; (b) simulated, experimental, and theoretical results for the deflection angles of the main lobes of the TE and TM modes excited by the aforementioned four wavelengths; (c) simulated calculation results for the optical loss of the OPA chip; (d) simulated and experimental results for the main lobe losses at the four wavelengths^[33]

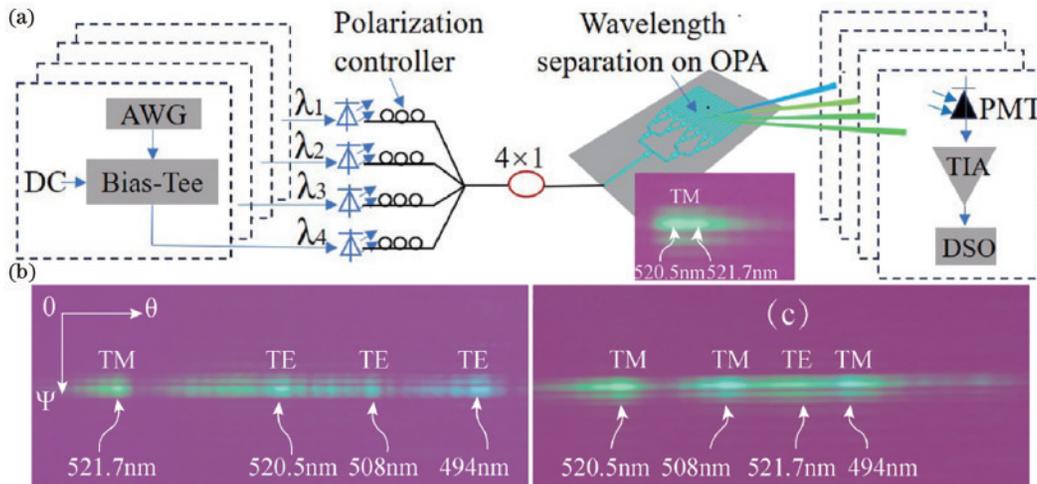


图 12 (a) 通过偏转敏感 OPA 实现的密集蓝绿解复用的概念验证演示系统,插图为波长为 520.5 nm 和 521.7 nm 时测得的 TM 模式远场光斑;(b) 实验测得的 494 nm TE、508 nm TE、520.5 nm TE 和 521.7 nm TM 模式的远场光斑;(c) 实验测得的 494 nm TM、521.7 nm TE、508 nm TM 和 520.5 nm TM 模式的远场光斑^[33]

Fig. 12 (a) The proof-of-concept demonstration of dense blue-green wavelength division demultiplexing via polarization-sensitive OPA, the inset is the measured far-field profile of TM modes at the wavelength of 520.5 nm and 521.7 nm; (b) (c) the measured far field profile of 494 nm TE, 508 nm TE, 520.5 nm TE, and 521.7 nm TM modes and 494 nm TM, 521.7 nm TE, 508 nm TM, and 520.5 nm TM modes^[33]

上 4 个波长激发的 TE 和 TM 模式主瓣偏转角的仿真、实验和理论结果。可以看出,实验测得沿 θ 方向 TE 模式主瓣偏转角分别为 61.3° 、 58° 、 55.2° 和 54.1° , TM 模式主瓣偏转角分别为 55.4° 、 51.8° 、 49° 和 48.1° 。以上实验结果与仿真结果一致。TE/TM 两种模式的偏转角与波长的理论关系可以基于光栅衍射方程计算得出^[19,26,28,38]:

$$\sin \theta = n_{\text{eff}} - \lambda / \Lambda, \quad (2)$$

式中: n_{eff} 为波导模式在不同波长时的有效折射率(以上 4 个波长 TE 模式有效折射率分别为 1.7、1.69、1.68、1.679, TM 模式有效折射率分别为 1.64、1.628、1.618、1.617); λ 为工作波长; Λ 为沿 θ 方向 1D 光栅周期; θ 是衍射光束与垂直于芯片的方向之间的夹角。可以看出, TE 和 TM 模式的主瓣理论转向角随波长线性变化,这与上述模拟和实验结果一致。特别是,对于 TM 模式, 520.5 nm 和 521.7 nm 波长之间的间隔角度为 0.9° , 小于它们的发散角之和 1° , 如图 12(a) 中的插图所示。这将导致密集蓝绿 WDM 在 VLC 应用中的通道串扰问题。另一方面,我们注意到 521.7 nm TE 模式的主瓣分布在 494 nm TM 和 508 nm TM 模式的主瓣之间,间隔角度分别为 1.3° 和 2.3° 。因此,波长间隔为 1.2 nm 的密集蓝绿波段 WDM OWC 可以通过 TE/TM 模式复用来实现,详细实现方式如图 12 所示。

为了研究该解复用器的传输效率,对 OPA 芯片每个元件的 TE 模式损耗进行了数值仿真分析。TM 模式的损耗和 TE 模式是类似的,所以这里只讨论 TE 模式的损耗。器件的总损耗包括 4 部分:由端面耦合器导致的输入光纤透镜到芯片的耦合损耗、6 级 MMI 分光器树的传输损耗、鱼骨型 OPA 天线的直通传输损耗和由远场旁瓣导致的栅瓣损耗^[28,39]。这 4 种损耗在蓝绿光波段 490~525 nm 波长范围内的仿真计算结果如图 11(c) 所示。可以看到,由于采用特制小模场光纤透镜将光耦合到芯片端面波导,大大降低了光纤到芯片的耦合损耗^[40]。理论上 OPA 芯片主瓣的传输效率取决于上面这 4 个损耗之和,将它们加在一起获得对于这 4 个波长通道的传输效率,具体如图 11(d) 中红线所示。可以看出,主瓣损耗在 -15 dB~ 20 dB 范围内。图 11(d) 中的蓝线表示主瓣的实验测得的传输效率,即主瓣的辐射功率除以输入光功率。在所有 4 个波长通道,所制造的 OPA 的发射效率约为 1%,相当于总损耗约为 20 dB。总体而言,传输效率的实验结果与仿真计算结果的变化趋势吻合得较好。

基于 OPA 模式复用的密集 WDM OWC 系统的实验装置如图 12(a) 所示^[33]。如上所述, WDM 系统包括由 4 个波长通道为 494 nm、508 nm、520.5 nm 和 521.7 nm 的入射尾纤 LD,每个通道由一个偏振控制器来激发鱼骨型波导天线中的 TE 或 TM 模式,用于构建模式复

用的 OWC。4 通道激光通过 1×4 耦合器合束,然后通过端面耦合器耦合到 OPA 芯片。图 12(a) 的插图显示了两个相邻波长 520.5 nm 和 521.7 nm 的 TM 模式相互重叠,这揭示了在密集蓝绿 WDM OWC 应用中通过模式复用实现远场主瓣空间分离的必要性。如图 10 和图 11 所示,在 OPA 芯片上进行 TE 和 TM 模式复用可以成功分离相邻波长通道的远场光斑,并实现密集的蓝绿 WDM OWC。上述 4 个波长的模式复用的两组远场光斑图如图 12(b)、(c) 所示,分别是 494 nm TE、508 nm TE、520.5 nm TE、521.7 nm TM、494 nm TM、508 nm TM、520.5 nm TM 和 521.7 nm TE 模式。可以看出,所有远场光斑彼此分离良好,最小波长间距为 1.2 nm。

为了进一步验证所提基于 OPA 模式复用的 OWC 系统的功能,我们测试了上述 4 个波长通道的所有 8 个 TE 和 TM 模式通道。图 13(a)、(b) 显示了在 RLS 自适应均衡^[41]之前 OOK 调制的四通道 WDM 在不同通信速率时的 BER,包括两种 WDM 组合: 1) 494 nm TE、508 nm TE、520.5 nm TE 和 521.7 nm TM 模式的复用; 2) 494 nm TM、521.7 nm TE、508 nm TM 和 520.5 nm TM 模式的复用。在信道均衡前,上述两组 WDM 组合的 OOK 调制总通信速率可分别达到 1.7 Gbit/s 和 2 Gbit/s,其各通道误码率均在 FEC 阈值 3.8×10^{-3} 下^[42]。为了提高光通信数据的准确性和可靠性,采用自适应 RLS 均衡器减少来自 PMT 和 LD 的噪声的影响,优化系统信号。RLS 均衡器是一种自适应均衡器,采用递归算法不断更新均衡器系数,旨在最小化预测信号与实际接收信号之间的误差^[41]。图 13(c)、(d) 是两个 WDM 组合在 RLS 自适应均衡之后四通道的 BER。可以看出,在 1 Gbit/s 通信速率下每个通道的 BER 都远远低于 FEC 的硬判决门限 3.8×10^{-3} 。可以预测,采用上述任意一组基于 OPA 模式复用的 WDM 系统的通信能力至少可以达到 4.0 Gbit/s,波长间隔为 1.2 nm。

图 13(e)、(f) 给出了 RLS 自适应均衡之前和之后在 1 Gbit/s 采样率下 520.5 nm 的信号幅度分布。可以看出,基于 OPA 的 WDM 信号质量在均衡后得到了有效增强。为了进一步评估密集蓝绿波分解复用中的通信质量,图 13(g)~(j) 给出了上述 OOK 调制的 520.5 nm 和 521.7 nm 通道在 1 Gbit/s 通信速率下经过 RLS 均衡后的眼图。 x 轴表示跨一位周期的时间, y 轴表示信号幅度。值得注意的是,520.5 nm 通道的眼图张开度优于 521.7 nm,这与图 13(a) 和表 2 中所示的结果一致。总体而言,在密集蓝绿波段 4 个通道眼图中心张开得清晰可见,表明通信信号具有低误码率和高信噪比,保证了每个通道以 1 Gbit/s 的通信速率下模式复用的高通信质量的实现。

表 2 总结了 RLS 信道均衡前后所有 WDM 通道的性能^[33]。

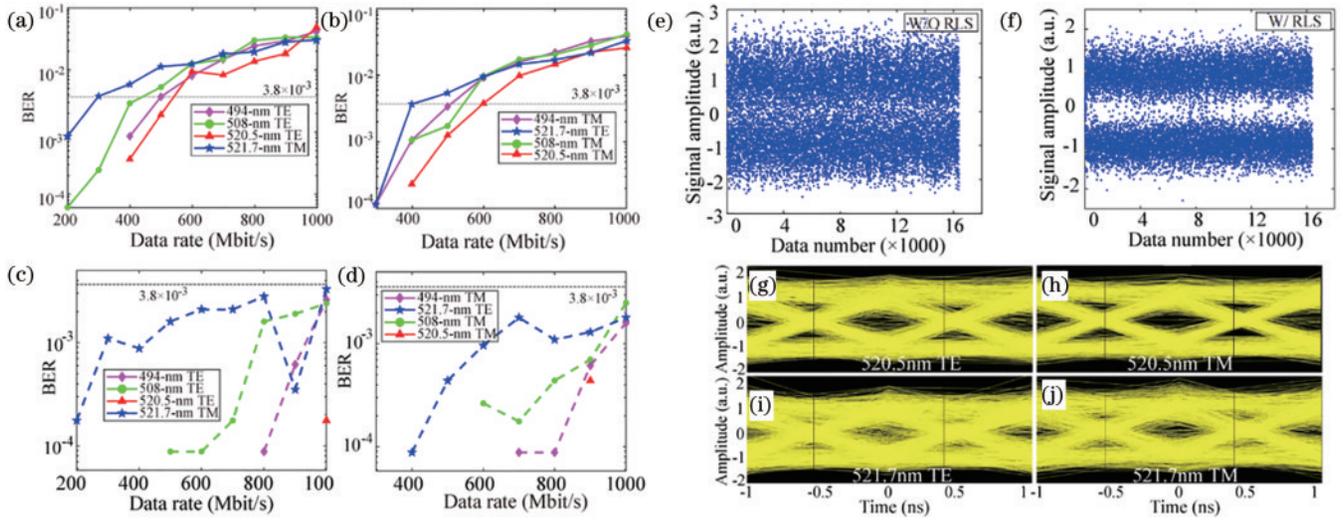


图 13 (a) (b)在 RLS 自适应均衡之前 OOK 调制的 4 通道 WDM 在不同通信速率时的 BER, 包括两种 WDM 组合: 494 nm TE、508 nm TE、520.5 nm TE 和 521.7 nm TM 模式的复用; 494 nm TM、521.7 nm TE、508 nm TM 和 520.5 nm TM 模式的复用; (c) (d)在 RLS 自适应均衡之后 OOK 调制的四通道 WDM 在不同通信速率时的 BER, 包括两种 WDM 组合: 494 nm TE、508 nm TE、520.5 nm TE 和 521.7 nm TM 模式的复用; 494 nm TM、521.7 nm TE、508 nm TM 和 520.5 nm TM 模式的复用; (e) (f) 1 Gbit/s 采样率下 RLS 自适应均衡之前和 (f) 之后的 520.5 nm 信号幅度分布; (g)~(j) 1 Gbit/s 通信速率下不同模式的通信信号经过 RLS 均衡后的眼图: 520.5 nm TE; 520.5 nm TM; 521.7 nm TE; 521.7 nm TM^[33]

Fig. 13 (a)(b) BER for 4-channel WDM using OOK modulation before RLS adaptive equalization at various communication rates, including two WDM combinations: 494 nm TE, 508 nm TE, 520.5 nm TE, and 521.7 nm TM mode multiplexing; 494 nm TM, 521.7 nm TE, 508 nm TM, and 520.5 nm TM mode multiplexing; (c) (d) BER for 4-channel OOK-modulated WDM after RLS adaptive equalization at various communication rates, with the same two WDM combinations as mentioned above; (e) (f) amplitude distribution of the 520.5 nm signal before and after RLS adaptive equalization at a 1 Gbit/s sampling rate; (g)-(j) eye diagrams of communication signals for different modes after RLS equalization at a 1 Gbit/s communication rate: 520.5 nm TE; 520.5 nm TM; 521.7 nm TE; 521.7 nm TM^[33]

表 2 RLS 信道均衡前后 WDM 各通道性能^[33]

Table 2 Channel performance before and after RLS equalization^[33]

Channel	DC V/V	RF V _{pp} /V	ROP / μ W	Before RLS equalization		After RLS equalization	
				Data rate /Gbps	BER	Data rate /Gbps	BER
494 nm TE	6.6	3.0	0.8	0.5	3.8×10^{-3}	1.0	2.5×10^{-3}
508 nm TE	6.7	2.5	1.1	0.4	3.0×10^{-3}	1.0	2.3×10^{-3}
520.5 nm TE	6.4	3.0	1.0	0.5	2.0×10^{-3}	1.0	1.8×10^{-4}
521.7 nm TM	6.6	3.0	0.9	0.3	3.8×10^{-3}	1.0	3.1×10^{-3}
494 nm TM	6.6	3.0	0.8	0.5	3.5×10^{-3}	1.0	1.7×10^{-3}
521.7 nm TE	6.6	3.0	0.9	0.4	3.8×10^{-3}	1.0	1.8×10^{-3}
508 nm TM	6.7	2.5	1.1	0.5	1.8×10^{-3}	1.0	2.5×10^{-3}
520.5 nm TM	6.4	3.0	1.0	0.6	3.8×10^{-3}	1.0	1.0×10^{-5}

5 现有蓝绿波分复用技术总结

现有蓝绿波分复用技术在不同应用领域的优缺点如表 3 所示。采用传统滤光片作为解复用元件具有低损耗的优势, 但是目前还无法获得精细的波长间隔, 通道数非常稀疏^[14-16]。传统衍射光栅可以作为解复用的核心元件^[43], 但是受限于可见光波段的光栅周期较大, 目前 WDM 通道间隔也较大^[15]。

基于 HCG 和 1D 光栅阵列的集成光学相控阵有望提供更小波长间隔的解复用^[32-33], 然而目前此类集成

光子器件插入损耗较高。需要进一步优化器件设计, 降低损耗, 才能在未来可见光通信领域展现出优势^[44-47]。蓝绿波分复用系统的详细技术参数比较如表 4 所示。

6 总结与展望

无线光通信凭借着高速率、低延时的优势将在未来 6G 无线网络中发挥重要作用。蓝绿波分复用技术必将极大提高蓝绿光通信的容量。目前蓝绿 WDM 的通道间隔较为稀疏, 通道数量受限, 从而很难满足大容

表 3 现有蓝绿 WDM 技术优缺点分析

Table 3 WDM channel parameters and performance

Work	MUX	DeMUX	Application	Advantage	Disadvantage
[14]	Free-space combiner	Optical filter	10-m underwater	Low loss	Coarse channel spacing
[15]	Polarizer and optical grating	Polarizer and optical grating	20-m free space and 3-m lighting	Moderate loss	Coarse channel spacing
[16]	Polarizer and fiber coupler	Polarizer and optical filter	100-m free space and 10-m underwater	Low loss	Coarse channel spacing
[32]	Fiber coupler	HCG	VLC	High loss	Fine channel spacing
[33]	Fiber coupler	1D grating array	VLC	High loss	Fine channel spacing

表 4 蓝绿波分复用系统技术参数比较

Table 4 Comparison with WDM systems in the blue-green band

Emitter	Modulation	Underwater distance	Data rate /(Gbit/s)	Channel count	Channel spacing	Reference
LED	OFDM	0	9.64	3	66 nm	[10]
LD	32QAM	10 m	5.34	2	80 nm	[14]
LD	PAM4	0	200	4	70 nm	[15]
LD	PAM4	10 m	300	6	26 nm	[16]
LD	8QAM	0	4.5	4	4 nm	[32]
LD	OOK	0	4	4	1.2 nm	[33]

量无线光通信的要求。集成阵列波导光栅已经广泛用于 DWDM 的 MUX/DeMUX, 蓝绿波段的集成光栅也有很大的优势开发出精细波长间隔的蓝绿波分复用器和解复用器。基于蓝绿 HCG 的解复用器, 已经实现了最小波长间隔 4 nm 的四通道 WDM 系统, 总通信速率达到 4.5 Gbit/s。进一步地, 基于偏振敏感的鱼骨型 1D 光栅阵列的 OPA 可以借助于偏振模式复用实现波长间隔 1.2 nm 的分光, 实现了四通道蓝绿 WDM, 总通信速率为 4.0 Gbit/s, 每个通道的 BER 都远远低于 FEC 的硬判决门限 (3.8×10^{-3})。展望未来, 若集成光栅技术能进一步减小光栅周期, 有望显著提升其分光能力, 从而实现具有小于 1 nm 波长间隔的蓝绿波分复用系统。

参 考 文 献

[1] Haas H. LiFi is a paradigm-shifting 5G technology[J]. *Reviews in Physics*, 2018, 3: 26-31.

[2] O'Brien D, Rajbhandari S, Chun H. Transmitter and receiver technologies for optical wireless[J]. *Philosophical Transactions Series A: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2020, 378(2169): 20190182.

[3] Chi N, Zhou Y J, Wei Y R, et al. Visible light communication in 6G: advances, challenges, and prospects [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2020, 15(4): 93-102.

[4] Huang T Y, Yang W, Wu J, et al. A survey on green 6G network: architecture and technologies[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 175758-175768.

[5] 迟楠, 贾俊连. 面向 6G 的可见光通信[J]. *中兴通讯技术*, 2020, 26(2): 11-19.

Chi N, Jia J L. Visible light communication towards 6G

[J]. *ZTE Technology Journal*, 2020, 26(2): 11-19.

[6] 施剑阳, 牛文清, 徐增熠, 等. 面向 6G 的可见光通信关键技术[J]. *无线电通信技术*, 2021, 47(6): 692-697.

Shi J Y, Niu W Q, Xu Z Y, et al. Key technology of visible light communication towards 6G[J]. *Radio Communications Technology*, 2021, 47(6): 692-697.

[7] Zeng Z Q, Fu S, Zhang H H, et al. A survey of underwater optical wireless communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(1): 204-238.

[8] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 1518-1547.

[9] MacLure D M, McKendry J J D, Islim M S, et al. 10 Gbps wavelength division multiplexing using UV-A, UV-B, and UV-C micro-LEDs[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(2): 516-523.

[10] Qiu P J, Zhu S J, Jin Z X, et al. Beyond 25 Gbps optical wireless communication using wavelength division multiplexed LEDs and micro-LEDs[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(2): 317-320.

[11] Optcore. DWDM Wavelength ITU channels chart: a complete guide[EB/OL]. (2022-07-10) [2023-11-12]. <https://www.optcore.net/article057/>.

[12] Ciaramella E, Arimoto Y, Contestabile G, et al. 1.28 terabit/s (32×40 Gbit/s) wdm transmission system for free space optical communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(9): 1639-1645.

[13] Yeh C H, Hsu W H, Wang B Y, et al. Fiber- and FSO-protected connections for long-reach TWDM access architecture with fault protection[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 189982-189988.

[14] Kong M W, Lv W C, Ali T, et al. 10-m 9.51-Gb/s RGB laser diodes-based WDM underwater wireless

- optical communication[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20829-20834.
- [15] Li C Y, Lu H H, Tsai W S, et al. White-lighting and WDM-VLC system using transmission gratings and an engineered diffuser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(22): 6206-6209.
- [16] Tsai W S, Lu H H, Wu H W, et al. 500 Gb/s PAM4 FSO-UWOC convergent system with a R/G/B five-wavelength polarization-multiplexing scheme[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 16913-16921.
- [17] Marchetti R, Lacava C, Carroll L, et al. Coupling strategies for silicon photonics integrated chips[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(2): 201-239.
- [18] Shuai Y Q, Zhou Z P, Su H. Toward practical optical phased arrays through grating antenna engineering[J]. *Photonics*, 2023, 10(5): 520.
- [19] van Acoleyen K, Bogaerts W, Jágerská J, et al. Off-chip beam steering with a one-dimensional optical phased array on silicon-on-insulator[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(9): 1477-1479.
- [20] Hutchison D N, Sun J, Doyle J K, et al. High-resolution aliasing-free optical beam steering[J]. *Optica*, 2016, 3(8): 887-890.
- [21] Raval M, Poulton C V, Watts M R. Unidirectional waveguide grating antennas with uniform emission for optical phased arrays[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13): 2563-2566.
- [22] Trinh P D, Yegnanarayanan S, Coppinger F, et al. Silicon-on-insulator (SOI) phased-array wavelength multi/demultiplexer with extremely low-polarization sensitivity [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(7): 940-942.
- [23] Siew S Y, Li B, Gao F, et al. Review of silicon photonics technology and platform development[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(13): 4374-4389.
- [24] Poulton C V, Byrd M J, Raval M, et al. Large-scale silicon nitride nanophotonic phased arrays at infrared and visible wavelengths[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 21-24.
- [25] Chul Shin M, Mohanty A, Watson K, et al. Chip-scale blue light phased array[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1934-1937.
- [26] Wang H J, Chen Z M, Sun C M, et al. Broadband silicon nitride nanophotonic phased arrays for wide-angle beam steering[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(2): 286-289.
- [27] Sun C M, Yang L S, Li B H, et al. Parallel emitted silicon nitride nanophotonic phased arrays for two-dimensional beam steering[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(22): 5699-5702.
- [28] Sun C M, Li B H, Shi W, et al. Large-scale and broadband silicon nitride optical phased arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(6): 8200710.
- [29] Poon J K S, Govdeli A, Sharma A, et al. Silicon photonics for the visible and near-infrared spectrum[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2024, 16(1): 1-59.
- [30] Hashemi H. A review of semiconductor-based monolithic optical phased array architectures[J]. *IEEE Open Journal of the Solid-State Circuits Society*, 2021, 1: 222-234.
- [31] Blanche P A. Holography, and the future of 3D display [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(4): 446-459.
- [32] Sun C M, Liu W W, Li B H, et al. Efficient blue-green light phased array based on high-contrast grating as a demultiplexer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2023, 35(14): 777-780.
- [33] Liu W W, Zhang K K, Li B H, et al. Blue-green wavelength division demultiplexing via polarization-sensitive optical phased array[J/OL]. *Journal of Lightwave Technology*: 1-7[2024-02-22]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10443497>.
- [34] Di Y J, Sun C M, Chen S Y, et al. Capacity enhancement of VLC by blue-green wavelength division multiplexing using optical phased array[C]//*Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2023, March 5-9, 2023, San Diego California, Washington, DC: Optica Publishing Group, 2023: M4F.2.*
- [35] Sun C M, Li B H, Zhang A D. High-resolution radiation characterization for an uniformly emitted SiNx nanophotonic phased array[C]//*2022 IEEE Photonics Conference (IPC), November 13-17, 2022, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE Press, 2022.*
- [36] Nie X M, Sun C M, Wang H J, et al. Detection of near- and far-field radiation pattern of a silicon-on-insulator optical phase array[C]//*2021 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 9-14, 2021, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021.*
- [37] Wang H J, Sun C M, Yang L S, et al. Uniform emission of large-scale optical phase arrays with wide wavelength tuning[C]//*2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), June 6-11, 2021, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021.*
- [38] Sun C M, Li B H, Zhang A D. High-resolution radiation characterization for an uniformly emitted SiNx nanophotonic phased array[C]//*2022 IEEE Photonics Conference (IPC), March 5-9, 2023, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE Press, 2022.*
- [39] Sun C M, Li B H, Shi W, et al. Theoretical model and validation for broadband optical phased arrays[C]//*2022 27th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2022 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), July 3-6, 2022, Toyama, Japan. New York: IEEE Press, 2022.*
- [40] Liu W W, Li B H, Sun C M. Enhanced coupling efficiency of optical fiber to green light waveguide by optical phased array[J]. *Proceedings of SPIE*, 2023, 12426: 124260U.
- [41] Wang Y G, Huang X X, Tao L, et al. 4.5-Gb/s RGB-LED based WDM visible light communication system employing CAP modulation and RLS based adaptive equalization[J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 13626-13633.
- [42] Dai Y Z, Chen X, Yang X Q, et al. 200-m/500-Mbps underwater wireless optical communication system

- utilizing a sparse nonlinear equalizer with a variable step size generalized orthogonal matching pursuit[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 32228-32243.
- [43] 张学彬, 唐义, 崔璐, 等. 光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0206003.
Zhang X B, Tang Y, Cui L, et al. Grating optical antenna for spectral wavelength division multiplex visible light communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0206003.
- [44] 陈勇, 胡陈毅, 刘焕淋, 等. 基于可见光通信的 LED 布局与功率分配的同步优化[J]. *光学学报*, 2023, 43(14): 1406002.
Chen Y, Hu C Y, Liu H L, et al. Simultaneous optimization of LED layout and power allocation based on visible light communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(14): 1406002.
- [45] 陈勇, 吴志倩, 刘焕淋, 等. 基于神经网络的可见光通信系统信道估计方法[J]. *光学学报*, 2023, 43(7): 0706004.
Chen Y, Wu Z Q, Liu H L, et al. Neural-network-based channel estimation method for visible light communication systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(7): 0706004.
- [46] 李博, 薛艳荣, 孔维成, 等. 基于波分复用的高精度光纤时频传递方法[J]. *光学学报*, 2023, 43(7): 0706001.
Li B, Xue Y R, Kong W C, et al. High-precision optical fiber time and frequency transfer method based on wavelength division multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(7): 0706001.
- [47] 肖华, 王艳菊, 王湛朗, 等. 可见光通信中无人机搜寻通信光源的优化方法[J]. *发光学报*, 2023, 44(12): 2277-2286.
Xiao H, Wang Y J, Wang Z L, et al. Optimization methods for UAVs to search light source in VLC[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2023, 44(12): 2277-2286.