光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023020802

面向增强现实的多模干涉型 RGB 波导合波器的对比研究

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： RGB 合波器作为激光扫描显示系统的关键性核心部件，其微小型化和高传输效率是应用于增强现实的必然要求。针对氮化硅、氮化镓、SU8 三种可见光波段高透过率材料，对比研究了其波导的折射率差、色散曲线、单模条件，以及所构成的多模干涉型 RGB 波导合波器的尺寸、传输效率、光场分布。研究结果表明，氮化硅器件的各项性能介于氮化镓与 SU8 器件之间；氮化镓器件具有最大的芯层与包层折射率差，最小的单模截止尺寸，最短的器件长度（2 000 μm）；SU8 器件具有最小的芯层与包层折射率差，最大的单模截止尺寸，但器件长度大于氮化镓，为 3 600 μm。此外，氮化硅、氮化镓、SU8 三种器件的 RGB 平均传输率分别为 78%，55%和 91%，可见 SU8 器件占有明显优势。未来，经过进一步优化设计的超紧凑氮化镓多模干涉型 RGB 波导合波器有望应用于激光扫描单片集成系统中，而具有良好柔性的 SU8 多模干涉型 RGB 波导合波器则在可形变系统中具有重要应用价值。这些器件为增强现实系统朝着微小型化和高传输效率的方向发展提供了技术基础。

关键词： 多模干涉；RGB 波导；合波器；增强现实

中图分类号： TN256 **文章编号：** 1001－5868(2023)03－0356－07

A Comparative Study of Multi-mode Interference RGB Waveguide Combiner for Augmented Reality (AR)

CHEN Zhi

(Shanghai Technical Institute of Electronics Information, Shanghai 201411, CHN)

Abstract: As a key component of laser scanning display system, it is an inevitable requirement for RGB combiner to be of miniaturization and high transmission efficiency applied in augmented reality. Waveguides formed by three different materials with high transparency in visible light band, such as silicon nitride, gallium nitride and SU8, were comparatively studied in aspects of refractive index difference, dispersion curve and single mode condition, as well as dimension, transmission efficiency and optical field distribution of multi-mode interference RGB waveguide combiners based on the waveguides. The results show that the performances of silicon nitride devices are somewhere between those of gallium nitride devices and SU8 devices. Gallium nitride devices have the largest core-cladding refractive index difference, the smallest single-mode cut-off size, and the shortest device length (2 000 μm). SU8 devices have the smallest core-cladding refractive index difference, the largest single-mode cutoff size, but the larger device length (3 600 μm) than that of gallium nitride devices. In addition, the average RGB transmission

收稿日期：2023－02－08.

* 通信作者：陈 直 **E-mail:** chenzhi@stiei.edu.cn

rate of the silicon nitride, gallium nitride and SU8 devices are 78%, 55% and 91%, respectively. The SU8 device dominates obviously. The optimized ultra-compact gallium nitride multi-mode interference RGB waveguide combiner is expected to be integrated to laser scanning monolithic systems, while SU8 multi-mode interference RGB waveguide combiner has great practical value in deformable systems due to its well flexibility. Those devices provide a solid technical foundation for the development of augmented reality systems towards microminiaturization and high transmission efficiency.

Key words: multi-mode interference; RGB waveguide; combiner; augmented reality (AR)

0　引言

随着高速通信、微型投影、计算芯片、大容量电池等技术的发展进步，虚拟现实(Virtual Reality，VR)和增强现实(Augmented Reality，AR)开始进入实用化阶段[1]。VR与AR系统主要由微型投影装置与光学显示系统两部分组成[2]。其中，微型投影装置是一个光机电一体化系统，可分为三大类。第一类以自发光器件为核心，包括有机发光二极管(Organic Light-Emitting Diode，OLED)[3]和微型发光二极管(Mini Light-Emitting Diode，MiniLED)[4-5]；第二类基于空间光调制原理，包括透射式液晶显示器(Liquid Crystal Display，LCD)[5]、反射式硅基液晶显示器(Liquid Crystal on Silicon，LCOS)[6]、数字光学处理器(Digital Light Processing，DLP)[7]；第三类是激光扫描装置(Laser Beam Scanning，LBS)[8]。在头盔式和眼镜式等近眼显示设备中，以上三种类型的投影装置都得到了较好的应用[9]。但是，在平视光学显示等增强现实环境中，基于自发光器件与空间光调制原理的微型投影装置不仅存在显示强度较弱，容易淹没在环境光中的弱点，而且还必须配备通过精心设计的光学显示系统，对光学反射镜的加工精度要求极高[10]。相较而言，基于高亮度激光与反射式扫描振镜的激光扫描装置不仅有效提升了显示强度，还避免了光学反射镜的使用，是一种比较理想的平视光学显示增强解决方案。该方案的核心技术在于红绿蓝(RGB)三色激光的合成。这是因为激光具有单色性，用于彩色扫描显示需要由RGB三色激光合成的准白色激光[8]。

已有的激光合束技术主要依靠体光学器件，例如：分束立方体、半透半反镜等。由于彩色显示技术要求至少具备红绿蓝三原色，因此采用能够实现两束激光合成的单个分束立方体是不够充分的。增加分束立方体的数量能够实现三束激光的合成，但是系统会变得复杂且庞大，而且还会因为分束立方体天然具备的透射特性而损失光能量，从而进一步降低显示光强度，影响增强现实的效果。基于半透半反镜的激光合束技术与分束立方体的技术方案相类似，具有光路复杂、体积庞大、能量易损等缺点，不满足集成化与小型化的基本要求。相较而言，基于光波导耦合技术的合波器尺寸能够缩小至毫米，甚至亚毫米量级，具有结构紧凑、易集成、传输效率高等优点。2014年，Katsuyama等[11]设计了一种定向耦合型RGB波导合波器，尺寸为7.8 mm。2015年，孙一翎等[12]提出了一种光子晶体型RGB波导耦合器，将器件尺寸缩小至微米量级。2018年，NTT公司在模式转换结构中利用二次耦合的方式将Katsuyama等设计的定向耦合型RGB波导合波器的尺寸缩小为原来的一半[13]，但该方法的传输效率为91%，低于Katsuyama等[11]设计的定向耦合型RGB波导合波器的平均传输效率。2021年，陈直[14]提出了一种用布拉格光栅实现RGB复用/解复用的方案，其理论上可以达到100%的传输效率。分束立方体RGB合波器的传输效率大至为80%，显著低于RGB波导合波器的传输效率。考虑到光机电系统对微小型化和高传输效率的现实需要，缩小RGB合波器的尺寸与提升其传输效率仍然是AR进一步发展面临的核心技术问题[15-21]。光波导器件在集成化与小型化方面具有天然的优势，已经在红外光通信网络中获得了广泛应用。然而，RGB波导合波器属于可见光波段器件，该类器件的研究仍处于起步阶段，相关报道较少[22-24]，有待系统性研究。尤其是RGB波导合波器的材料选取与结构设计这两大问题至关重要。由于材料的光学特性会随着波段的变化而改变，因此以往在红外波段被成功使用的光波导材料在可见光波段未必适用。此外，已有RGB波导合波器主要为定向耦合型，需要设计

模式转换结构，比较复杂[11]。

针对增强现实系统中微型投影装置面临的小型化与高效率的需求，本文提出了一种多模干涉型RGB波导合波器。相较于定向耦合结构，该多模干涉型RGB波导合波器不需要模式转换部分，不仅减少了设计工作量，而且降低了器件所占空间。为了了解不同材料对于器件性能的影响，对比研究了氮化硅、氮化镓、SU8三种材料多模干涉型RGB波导合波器的性能，分析了折射率差、色散曲线、单模条件、器件尺寸、传输效率、光场分布等特征参数。

1 多模干涉型RGB波导合波器的结构与原理

多模干涉指的是多模波导中各阶模之间相互干涉，在特定的位置形成一个或多个入射光场的像，也称为自映像效应[25-26]。该效应的物理实质是满足2π相位关系的导模之间的相长相干。如图1所示，以折射率阶跃型多模波导为例，其芯层折射率为n_g，包层折射率为n_c，宽度为w，工作波长为λ_0，拥有m个导模，每一阶导模的轴向传播常数β_p与横向波数k_{xp}之间的关系可以写为：

$$k_{xp}^2+\beta_p^2=k_0^2n_g^2 \tag{1}$$

其中，导模阶数$p=0,1,2,\cdots,m-1$，真空中的波数k_0与横向波数k_{xp}可以分别写为：

$$k_0=2\pi/\lambda_0 \tag{2}$$

和

$$k_{xp}=\frac{(p+1)\pi}{w_{ep}} \tag{3}$$

其中，w_{ep}是由波导第p阶模的古斯汉森位移导致的有效宽度，可以用第0阶模，也就是基模的有效宽度近似表达为：

$$w_{ep}\approx w_{e0}=w+\left(\frac{\lambda_0}{\pi}\right)\left(\frac{n_c}{n_g}\right)^{2\sigma}(n_g^2-n_c^2) \tag{4}$$

其中，σ是模式极化因子，对于TE模，$\sigma=0$，对于TM模，$\sigma=1$。把式(4)代入式(3)，再把式(3)代入式(1)，并应用$k_{xp}^2\ll k_0^2n_0^2$，得到：

$$\beta_p\approx k_0n_g-\frac{(p+1)^2\pi\lambda_0}{4n_gw_{e0}^2} \tag{5}$$

多模干涉耦合器设计的核心问题之一是寻找自映像在轴向的位置，该位置由波导的模间干涉决定。因此，给出基模与一阶模在轴向干涉的拍长：

$$L_\pi=\frac{\pi}{\beta_0-\beta_1}\approx\frac{4n_gw_{e0}^2}{3\lambda_0} \tag{6}$$

联合式(5)和式(6)得到任意高阶模与基模的传播常数之差：

$$\beta_0-\beta_p\approx\frac{p(p+2)\pi}{3L_\pi} \tag{7}$$

为了计算光波导中的光场，把光波导看成一个线性响应系统，对入射光场的各空间频率分量的响应具有线性叠加性。入射光场$U(x,0)$可以写为：

$$U(x,0)=\sum_p c_pu_p(x) \tag{8}$$

其中，$u_p(x)$是第p阶空间频率分量，对应第p阶导模，c_p是第p阶导模的响应系数，可写为：

$$c_p=\frac{\int U(x,0)u_p(x)\mathrm{d}x}{\sqrt{\int u_p^2(x)\mathrm{d}x}} \tag{9}$$

入射光场在轴向位置z的响应为：

$$U(x,z)=\sum_{p=0}^{m-1}c_pu_p(x)\exp[\mathrm{j}(\beta_0-\beta_p)z] \tag{10}$$

把式(7)代入式(10)，得到：

$$U(x,z)=\sum_{p=0}^{m-1}c_pu_p(x)\exp\left[\mathrm{j}\frac{p(p+2)\pi}{3L_\pi}z\right] \tag{11}$$

当式(11)的相位满足一定条件时，例如2π的整数倍，或者π的奇数倍，$U(x,z)$与$U(x,0)$相等，或者共轭相等，从而实现自映像。需要强调的是，入射光场的激励方式不同会导致波导内导模的数量不同，例如：入射光场在入射端某些特定位置激励波导会抑制一些导模的产生，从而控制模间干涉。采用这种方法，在距离波导入射端中心位置$\pm w_{e0}/6$处施加入射光场，从而抑制阶数为2,5,8,…的导模不被激发，使得产生自映像的轴向长度缩减为原来的三分之一，对器件的微小型化具有重要意义。

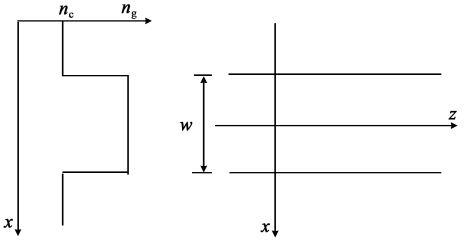


图1 折射率阶跃型波导示意图

RGB波导合波器要实现从三个不同端口入射的RGB三色激光在出射端口合为一束准白色激光的功能。利用多模干涉耦合器实现该功能的实质在于寻找合适的器件长度以同时满足不同波长产生自映像的条件，也就是该器件长度为不同波长的拍长

的公倍数。设计采用级联式多模干涉耦合器实现 RGB 三色激光的合波，结构示意如图 2 所示。

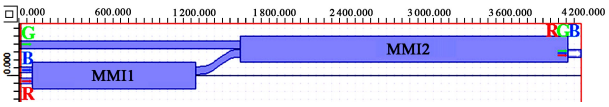


图 2　多模干涉型 RGB 波导合波器的结构示意图

该器件具有三个入射端口、两个多模干涉耦合器、一个出射端口。第一级多模干涉耦合器(MMI1)实现 R 光和 B 光的合波，第二级多模干涉耦合器(MMI2)实现 G 光与 RB 组合光的合波。为了实现合波功能，满足 RGB 三色波长的拍长公倍数的两个多模干涉耦合器的长度分别为：

$$\begin{cases} L_1 = a_r L_\pi^{\lambda_R} = a_b L_\pi^{\lambda_B} \\ L_2 = a_R L_\pi^{\lambda_R} = a_G L_\pi^{\lambda_G} = a_B L_\pi^{\lambda_B} \end{cases} \tag{12}$$

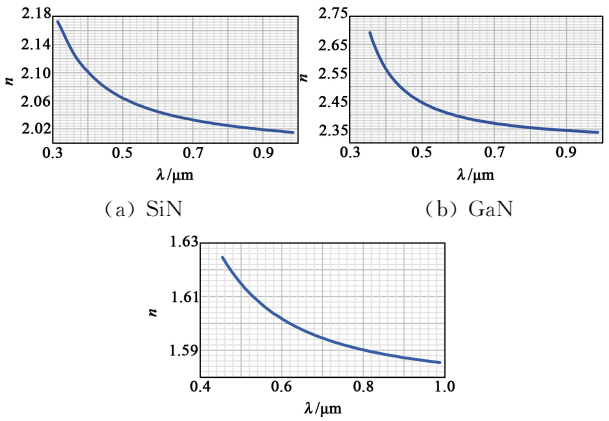
其中，a 是满足公倍数的系数，应尽可能小以达到器件小型化的目标。工作波长 λ_R，λ_G 和 λ_B 分别为 660，550 和 440 nm，对应 RGB 三色光。

2　器件结构与性能的对比分析

2.1　波导参数的对比分析

从光与物质相互作用的角度来看，可见光波段与红外波段在物质的光电子参数方面具有很多不同之处。因此，成熟的红外波段光波导器件不能简单地依靠缩减尺寸的方法应用于可见光波段。重新考虑材料在可见光波段的光学参数以及所构成光波导器件的性能是可见光波段波导器件研究的核心问题之一。

考虑对可见光吸收较低的氮化硅、氮化镓、SU8 三种材料作为器件的芯层材料，设计多模干涉型 RGB 波导合波器。图 3 给出了波长在 300～1 000 nm 范围内，氮化硅、氮化镓、SU8 三种材料的折射率随着波长的变化规律。以 660 nm 为例，氮化硅、氮化镓、SU8 三种材料的折射率分别为 2.037，2.385 和 1.593。单从折射率的数值大小来看，氮化镓更具优势。因为采用同样的包层材料，作为芯层的氮化镓与包层之间具有更大的折射率差，有利于获取更小的器件尺寸。然而，对于依赖不同波长的拍长公倍数的合波器件而言，决定该拍长公倍数的波长间折射率差也十分重要。考虑 660 nm 与 550 nm 之间的折射率差，氮化硅为 0.05，氮化镓为 0.12，SU8 为 0.02。显然，SU8 的值最小，意味着其具有最短的拍长公倍数和器件尺寸。

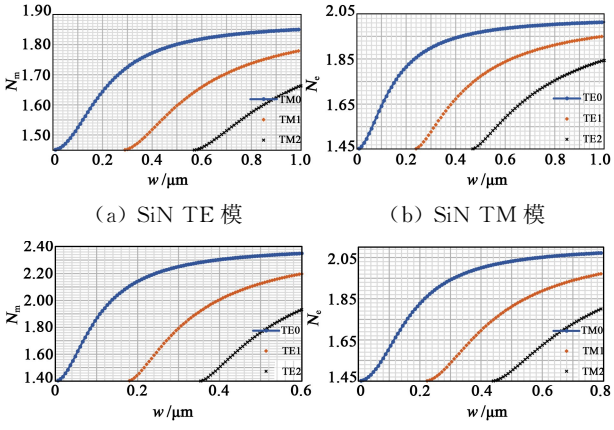


(a) SiN　(b) GaN

(c) SU8

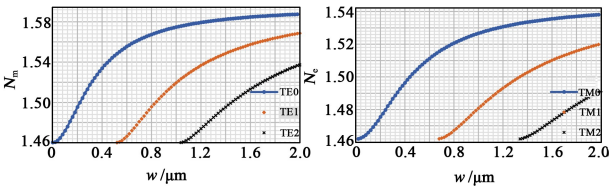
图 3　材料折射率随波长的变化曲线

为了进一步对比分析不同材料波导的性能，分别给出了氮化硅、氮化镓、SU8 三种材料波导的 TE 模与 TM 模的色散曲线，如图 4 所示，其中 w 为波导芯层宽度，h 为波导芯层厚度，N_e 为 TE 模有效折射率，N_m 为 TM 模有效折射率。例如，工作波长为 660 nm，氮化硅、氮化镓、SU8 波导均采用二氧化硅为包层材料，其折射率为 1.456 3。采用有效折射率法计算得到氮化硅波导的 TE1 模截止宽度为 245 nm，TM1 模截止宽度为 298 nm；氮化镓波导的 TE1 模截止宽度为 179 nm，TM1 模截止宽度为 214 nm；SU8 聚合物波导的 TE1 模截止宽度为 472 nm，TM1 模截止宽度为 697 nm。对比得出，氮化镓波导的横截面尺寸最小，SU8 聚合物波导的横截面尺寸最大。这个结果与前述折射率分析相一致，主要是由芯层材料与包层材料之间的折射率差所决定。从氮化硅、氮化镓、SU8 三种材料单模波导的横截面光场分布也可以看出，氮化镓波导对光场的束缚最紧密，仅仅需要 125 nm×125 nm 的截面尺寸，如图5(b)所示。氮化硅波导的芯层与包层



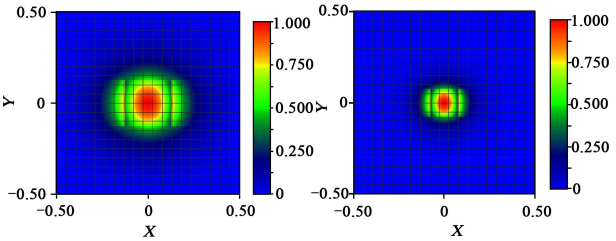
(a) SiN TE 模　(b) SiN TM 模

(c) GaN TE 模　(d) GaN TM 模

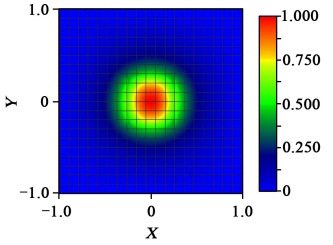


(e) SU8 TE 模　　(f) SU8 TM 模

图 4　氮化硅、氮化镓、SU8 波导的 TE 模与 TM 模色散曲线



(a) SiN　　(b) GaN



(c) SU8

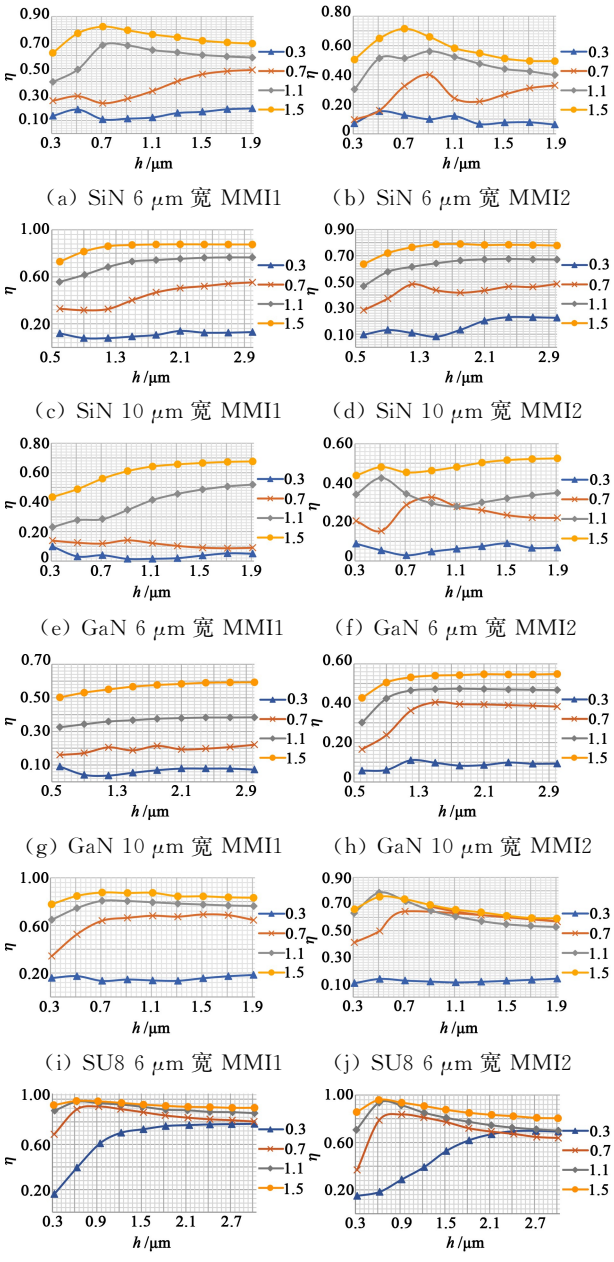
图 5　氮化硅、氮化镓、SU8 三种材料单模波导的横截面光场分布

的折射率差大约为氮化镓的一半，氮化硅单模波导的横截面尺寸大约为氮化镓的两倍，为 250 nm×250 nm，如图 5(a)所示。由于 SU8 波导的芯层与包层的折射率差较小，其单模波导的横截面尺寸相对较大，为 500 nm×500 nm，如图 5(c)所示。

2.2　器件性能的对比分析

芯层与包层之间的折射率差在本质上限制着导模的截止尺寸，决定了各阶模式的有效折射率，为波导器件的设计提供了基本依据。然而，对于多模干涉型 RGB 波导合波器而言，寻求合适的模间拍长以实现合波功能还需要综合考虑 RGB 三色光的模式匹配问题。

这种模式匹配主要通过设定各色光拍长的公倍数得以实现。与单模波导相比，多模波导在同样的厚度下宽度更宽。这里选定 3 μm 为多模波导的初始宽度，利用式(6)和(12)计算得到氮化硅多模干涉型 RGB 波导合波器前后两级多模干涉耦合器的长度 L_1 和 L_2 分别为 91 和 183 μm。由于理论计算得到的是近似值，因此该长度器件的传输效率(η)较低，只有 20%左右，必须做出优化。逐渐改变入射波导与多模波导的尺寸，对传输效率求优。图 6(a，b，c，d)给出了氮化硅多模干涉型 RGB 波导合波器的平均传输效率随波导厚度的变化曲线。当多模干涉耦合器的宽度为 6 μm 时，输入波导宽度为 1.7 μm，波导厚度为 0.7 μm，器件能取得最大的输出效率 65.36%；当多模干涉耦合器的宽度为 10 μm 时，输入波导宽度为 3 μm，波导厚度为 1.5 μm，器件能取得最大的输出效率 76.1%。此时，氮化硅多模干涉型 RGB 波导合波器总长 4 300 μm，其 RGB 三色光的传输光场如图7(a，b，c)所示。同理，得到



(a) SiN 6 μm 宽 MMI1　　(b) SiN 6 μm 宽 MMI2

(c) SiN 10 μm 宽 MMI1　　(d) SiN 10 μm 宽 MMI2

(e) GaN 6 μm 宽 MMI1　　(f) GaN 6 μm 宽 MMI2

(g) GaN 10 μm 宽 MMI1　　(h) GaN 10 μm 宽 MMI2

(i) SU8 6 μm 宽 MMI1　　(j) SU8 6 μm 宽 MMI2

(k) SU8 10 μm 宽 MMI1　　(l) SU8 10 μm 宽 MMI2

图 6　氮化硅、氮化镓、SU8 多模干涉型 RGB 波导合波器的平均传输效率随波导厚度的变化曲线

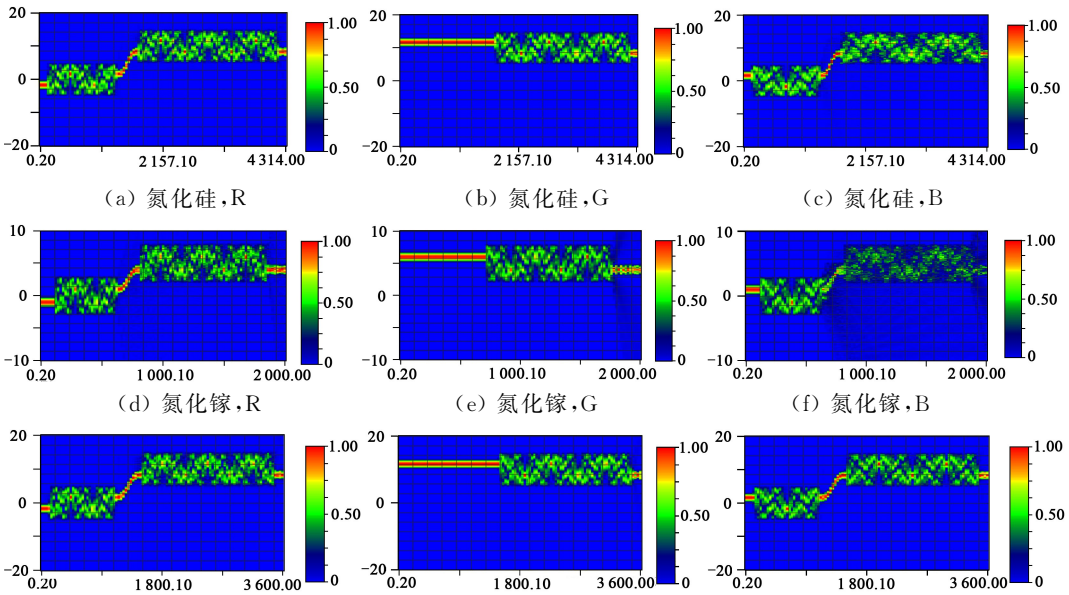


图 7　RGB 三色光在器件内沿轴向的光场分布

氮化镓和 SU8 多模干涉型 RGB 波导合波器的平均传输效率随波导厚度的变化曲线，分别如图 6(e,f,g,h)和图 6(i,j,k,l)所示。氮化硅和 SU8 多模干涉型 RGB 波导合波器的 RGB 三色光的传输光场，分别如图 7(d,e,f)和图 7(g,h,i)所示。

表 1 给出了器件的各项特征参数。对比分析可知，SU8 器件的平均传输效率最高，超过 90%；由于氮化镓波导的芯层与包层之间的折射率差较大，因此寻找 RGB 三色光拍长公倍数相对困难，导致 B 光的自映像位置不准确，从而引起了 B 光的传输效率较低；氮化硅器件的平均传输效率介于氮化镓与 SU8 之间，与氮化镓器件类似，其 B 光的传输效率较低。对于氮化硅与氮化镓器件存在的 B 光传输效率较低问题，有望经后期的优化设计得以解决。器件尺寸方面，由于氮化镓波导的芯层与包层之间的折射率差较大，因此器件相对较小，具有明显的优势。制作工艺方面，即使近年来氮化硅与氮化镓的制作工艺都有了长足进步，但是与半导体工艺中最常用的 SU8 相比，依然不够成熟。单就工艺复杂度来讲，SU8 更具优势。此外，SU8 材料具备良好的柔性，有望在一些需要器件弯折的情况中得到应用。

表 1　氮化硅、氮化镓、SU8 器件参数对比

材料	氮化硅	氮化镓	SU8
平均传输效率	0.78	0.55	0.91
R/G/B 传输效率	0.81/0.95/0.58	0.65/0.91/0.10	0.88/0.98/0.85
器件长度/μm	4 300	2 000	3 600
制作成本	较高	高	低
工艺复杂程度	较高	较高	简单
是否具有柔性	否	否	是

3　结论

从折射率差、色散曲线、单模条件、器件尺寸、传输效率、光场分布方面，较为系统地对比研究了氮化硅、氮化镓、SU8 三种材料多模干涉型 RGB 波导合波器。结果表明，氮化硅器件的整体性能介于氮化镓器件与 SU8 器件之间；氮化镓波导的芯层与包层折射率差较大，更易获得较小的器件尺寸，有利于器件的微小型集成化；SU8 波导的芯层与包层折射率差较小，器件尺寸稍大，但更易获取 RGB 三色光拍长的公倍数，传输效率较高，能够达到 90%以上，且工艺相对简单，材料具备柔性。基于这些良好的性能，多模干涉型 RGB 波导合波器有望作为微型激光扫描投影装置中的关键性核心部件应用于增强现实系统。

参考文献：

[1] Chang C L, Bang K, Wetzstein G, et al. Toward the next-generation VR/AR optics: A review of holographic near-eye displays from a human-centric perspective[J]. Optica, 2020, 7(11): 1563-1578.

[2] Güneş A, Koray K, Afsun Ş, et al. Applications of augmented reality in ophthalmology[J]. Biomed. Opt. Express, 2021, 12(1): 511-538.

[3] 谢嘉凤，王　振，陈　爱，等. 以 DCJTB 为颜色转换层的三原色 WOLED 研究[J]. 半导体光电，2019，40(5)：620-625.
Xie Jiafeng, Wang Zhen, Chen Ai, et al. Three primary-colored WOLED adopting DCJTB as color conversion layer[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(5): 620-625.

[4] 王 振，柳 菲，郑 新，等. 有机电荷产生层对叠层磷光OLED器件性能的影响[J]. 半导体光电，2018，39(3)：332-336.
Wang Zhen，Liu Fei，Zheng Xin，et al. Effect of organic charge generation layer on optoelectronic performance of tandem phosphorescent OLED [J]. Semiconductor Optoelectronics，2018，39(3)：332-336.

[5] 童嘉俊，尤宇财，王海波，等. Mini LED背光源在液晶显示面板上的照度均匀性[J]. 半导体光电，2021，42(4)：493-498.
Tong Jiajun，You Yucai，Wang Haibo，et al. Uniformity of Mini LED backlight on LCD panel [J]. Semiconductor Optoelectronics，2021，42(4)：493-498.

[6] Yin K，Hsiang E L，Zou J，et al. Advanced liquid crystal devices for augmented reality and virtual reality displays：Principles and applications[J]. Light：Sci. Appl.，2022，11(7)：1344-1365.

[7] 宋睿博，张 涛，崔文楠. 基于数字微反射镜与光源复合编码的高帧频显示方法[J]. 半导体光电，2022，43(3)：613-618.
Song Ruibo，Zhang Tao，Cui Wennan. High frame rate display method based on composite coding of digital micro mirror and illuminant[J]. Semiconductor Optoelectronics，2022，43(3)：613-618.

[8] Fretty P. Laser beam scanning fuels augmented reality's future [J]. Laser Focus World：The Magazine for the Photonics & Optoelectronics Industry，2022(2)：58，17-20.

[9] Bernard C K，Maria P. Holographic optics in planar optical systems for next generation small form factor mixed reality headsets[J]. Light：Advanced Manufacturing，2022，3(42)：1-31.

[10] Teich M，Schuster T，Leister N，et al. Real-time，large-depth holographic 3D head-up display：selected aspects[J]. Appl. Opt.，2022，61(5)：B156-B163.

[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] Li L，Lin H，Qiao S，et al. Monolithically integrated stretchable photonics[J]. Light：Sci. Appl.，2018，7(2)：17138.

[13] 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.

[14] 陈 直. 布拉格光栅结构RGB波导复用/解复用器的光学特性[J]. 半导体光电，2021，42(6)：789-794.
Chen Zhi. Optical properties of RGB waveguide multiplexers/demultiplexers with Bragg grating structure[J]. Semiconductor Optoelectronics，2021，42(6)：789-794.

[15] Chang S W，Liao W C，Liao Y M，et al. A white random laser[J]. Scientific Reports，2018，8(1)：2720.

[16] Nagelberg S，Zarzar L D，Nicolas N，et al. Reconfigurable and responsive droplet-based compound micro-lenses [J]. Nature Communications，2017，8：14673.

[17] Liu Z，Lin C H，Hyun B R，et al. Micro-light-emitting diodes with quantum dots in display technology[J]. Light：Sci. Appl.，2020，9(1)：83.

[18] Zhou X，Tian P，Sher C W，et al. Growth，transfer printing and colour conversion techniques towards full-colour micro-LED display [J]. Progress in Quantum Electron.，2020，71：100263.

[19] Hu Y，Luo X，Chen Y，et al. 3D-integrated metasurfaces for full-colour holography[J]. Light：Sci. Appl.，2019，8(1)：86.

[20] Choi M K，Yang J，Hyeon T，et al. Flexible quantum dot light-emitting diodes for next-generation displays [J]. Npj Flexible Electron.，2018，2(1)：10.

[21] Li Y F，Chou S Y，Huang P，et al. Stretchable organometal-halide-perovskite quantum-dot lightemitting diodes[J]. Adv. Mater.，2019，31：1807516.

[22] Chen Z，Wang G，Wang X. 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 Z，Wang G，Wang Xiong，et al. Moving toward optoelectronic logic circuits for visible light：A chalcogenide glass single-mode single-polarization optical waveguide switch [J]. Appl. Opt.，2017，56(5)：1405-1412.

[24] Sui G，Liu F，Guo H，et al. Flexible broadband white light multimode interference coupler[J]. Opt. Express，2021，29(19)：29730-29744.

[25] Besse P A，Bachmann M. Optical bandwidth and fabrication tolerances of multimode interference couplers [J]. J. Lightwave Technol.，1994，12(6)：1004-1009.

[26] Soldano L B，Pennings E. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging：principles and applications[J]. J. Lightwave Technol.，1995，13(4)：615-627.

作者简介：

陈 直(1982—)，男，吉林梨树人，博士，助理研究员，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开展博士后研究，主要研究方向为光波导与集成光学。