基于波导的AR显示技术

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/25521.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！



在过去几十年中，随着技术创新、微型显示技术的崛起以及高速数字处理器的迅速发展，增强现

实（AR）技术已经从一个遥不可及的未来概念演变为现实世界中的一项普及技术。AR通过将虚拟内容与真实场景完美融合，提升了我们对环境的感知和互动，为元宇宙、数位分身和空间计算等概念带来了令人兴奋的可能性。目前，这些概念已经在智能教育和培训、智能医疗、导航和路径规划、游戏和娱乐，以及智能制造和装配等领域广泛应用。

然而，要实现AR的最终愿景，硬件的发展仍面临巨大的挑战，尤其是光学合成器。作为AR系统的关键组件之一，光学合成器必须在保持头戴设备超轻薄的同时，具备卓越的光学性能才能匹配人类视觉系统极为出色的性能。

经过数十年的设备和材料研究以及对制造技术的大量投资，波导合成器已经脱颖而出，使这一愿景变为可能。

近日，来自中佛罗里达大学的Shin-Tson
Wu教授团队在卓越计划高起点新刊eLight上发表综述Waveguide-based augmented reality displays: perspectives and challenges。

首先回顾了AR中光学系统和光学合成器这两个关键组成部分的发展现状。详细介绍了几何波导和衍射波导两种合成器的工作原理和技术特点，并全面审视了这两种波导类型的耦合器。此外，还讨论了当前面临的挑战和可能的解决方案。作者深入探讨了波导合成器的设计，包括扩大出瞳、扩展视场角、耦合器的几何设计、全彩显示和均匀性优化等方面。最后，讨论了限制充分发挥波导合成器潜力的瓶颈，为AR显示指明了未来发展方向。

一、波导耦合器件

波导合束器依靠全反射来传导光场，使其具有宽广的视野和纤薄的外形。然而，波导合束器的关键组件是耦合器，因为耦合器的角度和光谱特性将直接影响成像参数和质量。在过去几十年中，多种不同类型的耦合器已经被提出，包括棱镜、镜子、浮雕光栅、全息光栅和超表面器件等。根据它们的特性，这些耦合器基本上可以分为几何波导耦合器和衍射波导耦合器（如图1）。

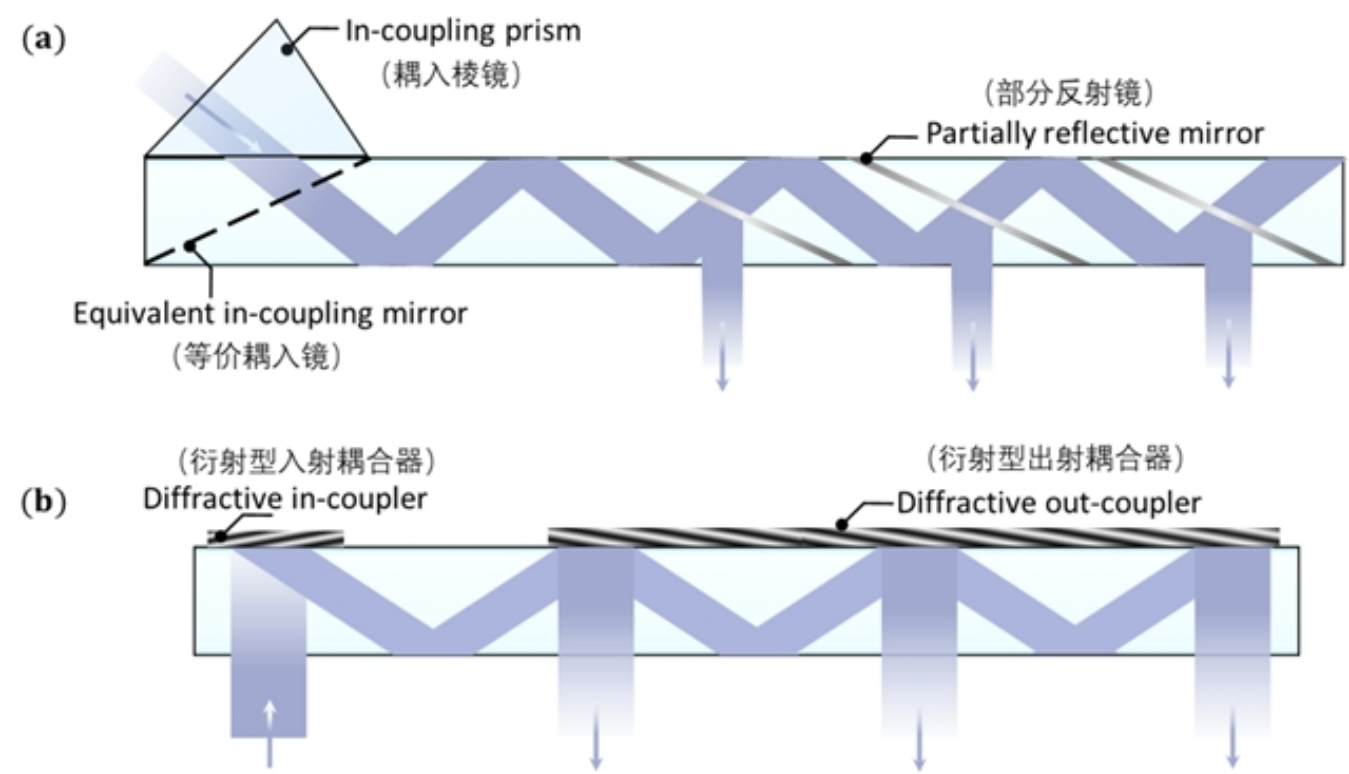


图1. （a）几何波导合成器结构，（b）衍射波导合成器结构。

1、几何波导耦合器

几何波导合成器主要由折反射等器件组成，主要采用棱镜和镜子作为主要耦合器件。镜子可用作入射耦合器和出射耦合器。在早期几何波导设计中，完全反射式的镜子被用作入射耦合器，将来自光机的光引导进波导，实现全反射。随后，光在波导中传播，遇到另一个镜子，然后完全耦出到用户的眼睛中。然而，这种设计在视野（FoV）和eyebox大小方面存在限制。为了解决这一问题，部分反射镜子阵列被用作出射耦合器，使光能够均匀多次地从波导中耦出，从而实现大而均匀的eyebox。尽管这一过程看似简单，但每个部分反射镜子都需要经过多次复杂的镀膜处理，以生成不同的反射透射比，这大大增加了这种波导量产的难度。另一种常见的耦合器是棱镜，通常用作入射耦合器，将光引导入波导中，有时也用作出射耦合器。作为入射耦合器，棱镜通常粘附在波导表面上，或者通过波导的边缘被切成一个角度来实现。

几何波导合成器的主要问题源于耦合器上不希望出现的反射，这可能导致杂散光和鬼像，严重降低图像的质量。这些杂散光产生的原因有三种主要方式。首先，入射光与耦入镜子之间发生两次相互作用，产生杂散光。这种杂散光可以通过将入射镜子替换为具有吸收特性的棱镜来消除。另外两种情况分别是波导中的光与出射镜子的前表面或后表面发生不希望有的反射，均源于出射镜子在特定角度上的不完美透射。为解决这些杂散光问题，未来的镀膜技术需要有更高的要求。

2、衍射波导耦合器

如字面所示，衍射波导合成器主要依赖衍射光学元件作为耦合器。在衍射光学元件中，光栅是最常见的耦合器类型。光栅展现出自我重复的衍射结构，可以通过在光学元件表面进行表面调制、在其体积内进行折射率调制，或者采用其他相位调制方法，如几何相位调制和谐振相位调节等。

具体而言，衍射光栅耦合器主要分为四种类型：表面浮雕光栅（SRGs）、体全息光栅（VHGs）、偏振体全息光栅（PVGs）和超表面光栅。由于光栅会引入色散问题，因此通常入射耦合器和出射耦合器需要具有对称的k矢量结构以解决这个问题。但在某些情况下，入射耦合器和出射耦合器也可以采用离轴衍射透镜。本综述全面讨论了四种光栅耦合器的原理、光学特性以及制造工艺，并提出了未来的发展需求。

除此之外，本文特别指出，随着衍射耦合器材料性能和制造工艺的提升，衍射波导合成器显示出巨大的潜力，但与此同时也带来了一系列挑战。这些挑战包括彩虹效应、入射耦合器的漏光（低效率）、出射耦合器的漏光（眼睛发光效应）、鬼像和相位失真等。文章对这些问题进行了深入分析，并提出了可能的解决方案。

二、波导合成器设计

1、扩大出瞳（EPE）

与传统的AR显示系统相比，基于波导的AR显示系统通过EPE过程提供了更大的eyebox。这项技术提高了系统的etendue，同时保持超薄结构。该综述全面回顾了各种不同的扩瞳方案，讨论了它们的优点、缺点和设计细节。这些扩瞳方案包括一维扩瞳、传统二维扩瞳（由两个不同方向的一维扩瞳组成）、由两个交叉光栅组成二维扩瞳、蝴蝶结构扩瞳、集成双轴扩瞳以及四光栅序列扩瞳等。由于几何波导和衍射波导利用不同的原理，它们的扩瞳方案也有所不同，本文对这些差异进行了详细讨论。

2、扩展FoV

FoV反映了图像在用户眼前的显示大小。在波导合束器中，FoV主要受两个因素的限制。首先，波导基底的折射率是几何波导合束器和衍射波导合束器中FoV受限的根本原因之一。具体而言，由于衍射波导和几何波导利用不同的原理，几何波导的理论FoV天然较衍射波导的理论FoV大近两倍。另一个因素主要源自耦合器的角度响应。即使波导的折射率再高，耦合器的角度响应也会直接决定最终的FoV。因此，要实现FoV的扩展，需要同时考虑这两个因素。该综述详细探讨了各种不同的方法来扩展耦合器的角度响应。例如，通过优化SRG的结构参数、增加VHG的折射率调制、增加液晶的双折射、设计多层结构、采用滚动k矢量入射耦合器，还有超表面的偏振复用等。

3、波导耦合器结构设计

与传统光学合成器不同，波导合成器的厚度几乎不受FoV和eyebox的影响。然而，波导耦合器的结构尺寸与FoV和eyebox的大小密切相关。本综述详细介绍了入射耦合器、出射耦合器和EPE耦合器的结构设计，以及以传统的二维扩瞳方案为例进行了解释。通常情况下，入射耦合器的大小取决于光机的辐射锥大小以及准直透镜的焦距，而出射耦合器的尺寸则由FoV和eyebox决定。随后，根据视场角、入射耦合器和出射耦合器的大小和位置，可以确定EPE耦合器的设计。

4、全彩显示

在几何波导合束器中，所有的耦合器均为折射或反射元件，这使得入射光与耦合器相互作用时几乎不会引发色散问题。因此，单一波导可以同时传播RGB颜色，实现全彩显示。然而，衍射波导合成器面临色散问题的挑战。衍射引入的色散使得实现全彩显示变得困难。通常在一片波导中，

可以利用k矢量对称的入射与出射光栅来弥补衍射造成的色散，但这仍然可能导致颜色的不均匀性。由于光谱通常由红、绿和蓝三种颜色组成，因此缓解色散问题的一种简单方法是使用三个波导分别传导这三种颜色的光。尽管这种方法可以显著增加FoV，但也会增加系统的厚度和重量，并引入错位问题，从而影响成像质量。因此，在保持FoV不变的情况下减少波导数量变得至关重要。最近满足此要求的两层波导结构被提出，其中一层波导传播蓝色和部分绿色光场，另一层波导传播红色和其余绿色光场。然而，这种设计需要对波导的效率进行精确控制，以确保两部分绿色光场能够无缝连接。此外，还可以采用消色差耦合器，如消色差超表面器件。由于超表面具有较高的设计自由度，这使得实现消色差成为可能。但要实现全部可见光波段的色差校正可能会导致超表面器件过小。因此，对红、绿、蓝三种颜色进行色差校正可能已足够，从而实现大尺寸的超表面耦合器。到目前为止，多层超表面结构，例如由TiO2和SiO2构成的多层纳米脊状结构以及由Al、Ag和Au构成的三层超表面结构已经被提出，但加工这些多层结构仍然具有挑战性。未来，有望利用色散工程超表面方案，通过单层结构实现色差校正。

5、均匀性优化

均匀性是AR显示技术中的重要概念，通常包括颜色均匀性和亮度均匀性两个方面。颜色均匀性涉及AR显示在FoV和eyebox中对色彩的准确再现。在几何波导中，由于主要依赖折射和衍射原理，颜色均匀性通常不成问题。然而，在衍射波导中，由于衍射效应，颜色均匀性可能会受到较大的影响。尽管采用三层波导结构可以在一定程度上提高颜色均匀性，但由于红、绿、蓝LED光源仍然具有大约30纳米的光谱宽度，这并不能直接解决问题。因此，通过优化EPE耦合器和出射耦合器等方法可以缓解颜色均匀性问题，如调整SRGs的高度和占空比、优化VHGs的Bragg角度以及调整PVGs的入射光偏振态等。亮度均匀性是AR显示中另一个关键因素，它涉及AR显示在FoV和eyebox内提供一致亮度的能力。无论是在几何波导还是衍射波导中，都需要对EPE耦合器和出射耦合器的效率进行精确控制，以确保亮度均匀性。因此，耦合器参数的优化对实现亮度均匀性至关重要。最后，为了进一步减轻均匀性问题，可以考虑使用电子矫正方法。然而，这种方法也可能导致系统效率的牺牲。因此，在AR显示技术的发展中，如何在均匀性和效率之间取得平衡成为一个关键挑战。

三、前景与挑战

这一综述全面总结了基于波导的AR显示技术的最新进展，并探讨了两种主要波导合成器，即几何波导合成器和衍射波导合成器的原理、特点以及面临的挑战。在表1中，作者总结了这两种波导合成器的关键光学性能。

表1. 不同波导合成器的比较

波导合成器	效率	视场角	尺寸	主要挑战
衍射波导	低	中等（SRGs）， 小（VHGs）	小（单片波导）， 中等（多片波导）	颜色均匀性， 效率，眼闪光，彩虹效应
几何波导	高	大	小	杂散光，制造工艺

在一般情况下，几何波导合成器拥有潜在较大的视场角、良好的颜色均匀性、可忽略的眼睛发光现象以及高效率等优点，但其制造工艺较为复杂，且产量较低。因此，急需开发高质量且高产量的涂层技术。反之，衍射波导合成器的效率相对较低，视场角较小，同时存在其他问题，如颜色均匀性差、严重的眼睛干扰和彩虹效应。对于衍射波导来说，均匀性和效率是两个主要挑战，但它们之间又相互制衡。因此，如何提高衍射波导合成器的效率并保持良好的均匀性将成为未来最迫切需要解决的问题。随着各种EPE设计、制造工艺以及衍射耦合器材料性能的迅速提升，衍射波导逐渐能与几何波导媲美。例如，通过光刻技术制造的SRG和具有高折射率调制的全息聚合物分散液晶(HPDLC)。此外，新型的衍射耦合器PVGs具有独特的光学特性，如动态调制能力，可以增强基于波导的AR显示的功能性。与此同时，新兴的超表面耦合器为AR波导的设计提供了更广泛的自由度，例如色差校正。尽管目前PVG和超表面耦合器仍处于研究阶段，但随着制造工艺的进步和材料的发展，它们有望在AR显示中提供更卓越的性能，甚至超越传统耦合器。这些创新预计将推动AR显示技术迈向更广阔的前景，改变我们与数字世界互动的方式。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1186/s43593-023-00057-z

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“ 来源 ”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。
作者：Shin-Tson Wu 来源：eLight

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发