

消费级 AR 眼镜系列报告（三）：

AR 眼镜核心技术：光波导演进、材料革新与微显示升级

报告要点

AR 眼镜光学方案逐步聚焦，光波导被行业视为实现轻量化消费级产品的关键技术路线之一。行业已全面淘汰视场角仅 10°-20°的棱镜方案、重量超 500g 的自由曲面方案；Birdbath 透光率不足 30%、光学效率仅 15%-20%，仅为过渡方案。光波导则凭借轻薄形态、高透光率与大视场潜力确立为长期终极路线，其厚度可压至 3mm 以内、透光率超 85%。其中表面浮雕光波导（SRG 兼顾性能与量产可行性，成为当前主流技术方向，也是微软、Meta、国内头部品牌旗舰机型的共同选择。几何光波导、体全息光波导、偏振体全息光波导同步迭代，技术格局趋于清晰。

光波导体系内部分化明显，几何、衍射、体全息路线优劣清晰，核心瓶颈可量化。几何光波导成像质量最优、漏光率仅 1%-5%，但受限于纳米级镀膜与分子键合工艺，量产良率偏低；衍射光波导受制于光栅加工精度与高折胶材料；表面浮雕光波导（SRG）量产性最佳，但存在固有彩虹纹，彩边强度仅能降低 30%-50%；体全息与偏振体全息光波导理论光效更高，但受光敏材料折射率限制，视场角多在 30°-40°，环境稳定性控制难度大。

碳化硅（SiC）从材料底层破解光波导痛点，关键参数实现代际突破。SiC 折射率超 2.6、热导率高达 490W/m·K，可使单层光波导视场角突破 80°，并从原理上抑制彩虹纹、省去复杂散热结构。Meta Orion 原型机已实现 70°视场角验证，国内三安光电、天岳先进、天科合达已推出 4-12 英寸光学级 SiC 衬底，但材料成本仍达数千元/片，硬脆特性带来极高加工难度，处于从 0 到 1 突破后的产业化攻坚期。

微显示技术迭代方向明确，亮度、体积、功耗三大指标决定路线成败。LCoS、DLP 光机体积达 4-6cc，难以适配轻薄化；LBS 体积仅 0.5-1cc 但存在散斑与分辨率瓶颈；Micro-OLED 为当前中高端主流，对比度达百万级，但亮度仅 1000-6000nit、寿命不足 1 万小时；Micro-LED 亮度可达 10 万 nit 级、体积 < 0.5cc、寿命超 10 万小时，与 SiC 光波导匹配度最高，是下一代标配方案，但全彩巨量转移良率仍待突破。

风险提示： 1、若 AR 光学、光波导、SiC 材料及微显示技术进展不及预期，可能导致行业产业化落地节奏放缓。
2、核心工艺良率提升缓慢、关键材料成本居高不下，或将制约 AR 眼镜规模化普及进程。

电子

评级： 看好

日期： 2026.05.13

分析师 何晓敏

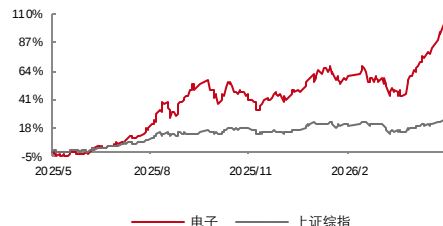
登记编码：S0950523110001

☎：（021）6139 2631

✉：hexiaomin@w kzq.com.cn

行业表现

2026/5/13



资料来源：Wind，聚源

相关研究

- 《消费级 AR 眼镜系列报告（二）：从“能戴”到“愿戴”：AR 智能眼镜核心瓶颈与破局方向》(2026/4/27)
- 《Meta 智能眼镜产品深度解析：技术、生态与商业化全景图》(2026/2/27)
- 《消费级 AR 眼镜系列报告（一）：破局与展望——全球 AR 市场增长逻辑与投资机遇》(2025/12/4)
- 《碳化硅高速增长的前夕：功率渗透率提升与 AI+AR 双轮驱动》(2025/11/24)
- 《AI 驱动智慧中枢崛起，小米智能眼镜开启可穿戴实用主义新纪元》(2025/7/2)
- 《半导体材料系列报告之一：国际形式严峻，国产半导体材料行业如何发展》(2025/6/26)
- 《AI+AR 交互新范式，雷鸟 X3 Pro 重塑行业里程碑》(2025/6/5)
- 《Rokid AR Lite 开售，引领空间计算时代》(2024/8/6)
- 《半导体硅片景气度向好，国产厂商前景可期》(2024/7/18)
- 《电子行业半月报：AI 赋能智能设备，头部厂商折叠屏手机加速布局》(2024/7/18)

内容目录

一、光学方案进化：从传统方案到光波导核心.....	4
1.1 棱镜方案：早期探索与形态瓶颈.....	4
1.2 自由曲面方案：性能优化与体积困境.....	5
1.3 Birdbath 方案：主流消费市场的“权宜之计”	5
二、光波导：通向“日常佩戴”的必由之路	6
2.1 几何阵列光波导：成像效果优秀，量产难度较大.....	7
2.2 衍射光波导：主流发展趋势，工艺升级提升性能.....	9
表面浮雕光波导（SRG）：平衡性能与量产的最优解	9
体全息光波导（VHG）：理论优势明显，尚处发展初期.....	12
偏振体全息光波导（PVG）：突破视场角限制的新路径	15
三、碳化硅（SiC）：光波导技术升级的核心基底材料.....	17
3.1 核心优势：高折射率与高热导率破解光波导核心痛点.....	17
3.2 核心挑战：材料成本与加工工艺的产业化壁垒.....	19
3.3 发展现状与市场格局：从实验室验证到供应链攻坚.....	19
四、微显示技术更新：5 种方案的性能取舍	20
风险提示	22

图表目录

图表 1：棱镜方案技术原理.....	4
图表 2：棱镜典型产品-GoogleGlass	4
图表 3：自由曲面方案技术原理.....	5
图表 4：自由曲面典型产品-Moverio BT-45C	5
图表 5：Birdbath 方案技术原理.....	5
图表 6：Birdbath 典型产品-XREAL Air 2	5
图表 7：波导型近眼显示器光路图.....	6
图表 8：列阵光波导原理示意图（一维扩瞳）	7
图表 9：列阵光波导原理示意图（二维扩瞳）	7
图表 10：阵列光波导工艺流程.....	8
图表 11：胶合工艺流程图.....	8
图表 12：键合工艺流程图.....	9
图表 13：衍射光波导工作原理示意图.....	10
图表 14：SRG 三种工艺对比.....	11
图表 15：体全息光栅原理图.....	13
图表 16：体全息光栅的记录光路.....	13
图表 17：体全息光栅的记录和复现过程示意图.....	13
图表 18：体全息光栅原理图.....	14
图表 19：体全息光栅的记录光路.....	14
图表 20：体全息光栅的记录和复现过程示意图.....	14
图表 21：PVG 的偏振选择特性	15

图表 22: PVG 的反常偏振选择特性	15
图表 23: PVG 作为波导显示器入射耦合器的工作原理	16
图表 24: 主流光波导技术方案对比.....	16
图表 25: SiC 波导于 635（左）、528（中）及 463（右边）纳米波长（三色光）下的在视场角（FOV）与出耦效率	17
图表 26: SiC 波导中环境光的衍射	18
图表 27: 传统 AR 波导（ $n=2.0$ ）可能导致彩虹伪影.....	18
图表 28: SiC 波导布局分布示意图（左）和截面图（右）	18
图表 29: 碳化硅外延片缺陷对最终器件对影响.....	19
图表 30: Sic 镜片发展历程.....	19
图表 31: Sic 晶圆示意图.....	20
图表 32: 微显示技术对比.....	21

AR 眼镜作为下一代人机交互核心入口与消费电子新形态，承载着虚实融合、全天候智能交互的产业愿景，正步入技术迭代加速、产品形态快速演进的关键阶段。

当前行业虽呈现百花齐放的技术探索格局，但从实验室走向消费级大规模普及仍面临多重瓶颈，光学显示、整机重量、体验成本等核心问题尚未根本性破解。本报告立足 AR 眼镜核心技术路线与产业化痛点，系统剖析光学方案迭代、重量控制难点，并借鉴智能手表从小众试水到大众普及的成熟发展路径，提炼可落地的演进逻辑，展望 AR 眼镜突破瓶颈、迈向规模化商用的未来方向。

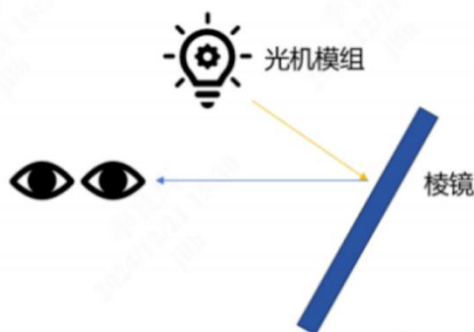
一、光学方案进化：从传统方案到光波导核心

增强现实（AR）光学系统是决定设备成败的核心，它直接主导了用户体验与产品形态两大关键维度。AR 光学的核心挑战在于，如何在极致轻薄、可供全天候佩戴的形态中，实现足够宽广的视场角（Field of View, FOV）、足够大的眼动范围（Eyebox），并保证高光学效率与高透光率，从而将虚拟信息无缝叠加于现实世界。当前市场呈现出多种光学方案并存的“百花齐放”格局，从早期的棱镜、自由曲面，到当前消费级市场主流的 Birdbath，再到被行业公认为终极解决方案的光波导，每条技术路线都代表了在特定时期内，行业对性能与形态这对核心矛盾的理解与权衡。

1.1 棱镜方案：早期探索与形态瓶颈

棱镜（Prism）方案是最早期的 AR 光学技术之一，其基本原理是利用简单的全内反射或半透半反镜面，将来自微型显示器的光线直接耦合进入眼视场，属于一种结构相对简单的几何光学方案。作为该技术的标志性产品，谷歌推出的 Google Glass 将 AR 概念首次带入大众视野，其企业版二代（Google Glass Enterprise Edition 2）搭载了分辨率为 640x360 像素的 LCoS（硅基液晶）显示屏，配备 800 万像素摄像头，整机（不含镜框）重量约为 46 克。

图表 1：棱镜方案技术原理



资料来源：易观分析，五矿证券研究所

图表 2：棱镜典型产品-Google Glass



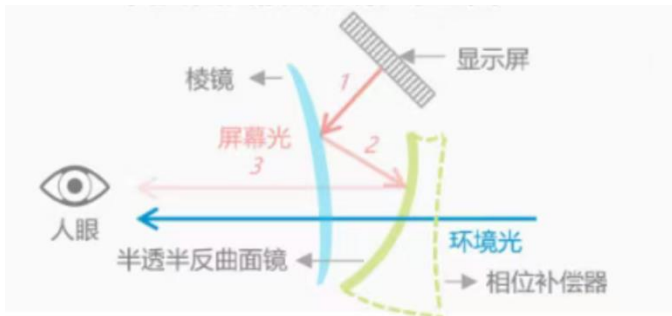
资料来源：VR52，五矿证券研究所

尽管 Google Glass 在概念上极具开创性，但其光学方案的局限性也暴露无遗，棱镜方案的物理结构决定了其光学模组的体积与视场角大小存在直接且难以调和的矛盾。为了维持可接受的体积，其视场角被严重限制在 10-20 度之间，仅能在视野中央提供一个极小的信息窗口，远未达到“增强现实”的沉浸感。同时，其厚度通常大于 10mm，透光率仅为 40-50%，在眼前形成一个明显遮挡，使得设备形态笨重突兀，难以被社会公众接受。Google Glass 在消费市场的失败，除了隐私争议外，其根本原因在于硬件形态未能跨越用户接受的门槛。市场对这种“科技感”过强的外观的排斥，直接催化了行业对更轻薄、更隐蔽、更接近普通眼镜形态的光学方案（如光波导）的迫切追求。

1.2 自由曲面方案：性能优化与体积困境

自由曲面（Freeform）方案可视为棱镜方案的演进版本。它采用一个或多个具有非旋转对称复杂曲面的光学元件，通过更复杂的光路设计来校正像差，从而在实现更大视场角的同时，保证了较好的成像质量。该方案凭借其相对成熟的工艺和可靠的成像效果，在工业、医疗等对设备坚固性和功能性要求高于外观的 B 端（企业级）市场占据了一席之地。

图表 3：自由曲面方案技术原理



资料来源：艾瑞咨询，五矿证券研究所

图表 4：自由曲面典型产品-Moverio BT-45C



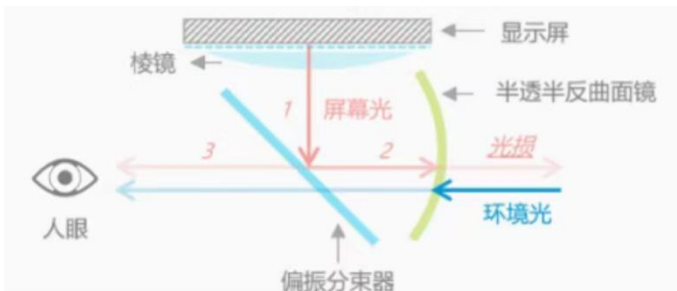
资料来源：Epson 官网 五矿证券研究所

其典型代表是爱普生（Epson）的 Moverio 系列智能眼镜。以其较新的工业型号 Moverio BT-45C 为例，该设备搭载了 1080p 全高清分辨率的 Si-OLED 双目透视显示屏，提供了 34 度的视场角，并具备 IP52 级别的防尘防水能力和符合 MIL-STD-810H 标准的抗冲击性，充分满足了工业环境的严苛要求。然而，性能的提升是以体积和重量为代价的。自由曲面方案的光学模组厚度通常超过 10mm，导致整机异常笨重，如 BT-45C 的重量高达 550 克，形态更接近头盔或护目镜，不适用于日常消费场景。

1.3 Birdbath 方案：主流消费市场的“权宜之计”

Birdbath 方案是当前消费级 AR 眼镜市场中应用最广泛的技术，其光学结构主要由分光镜和球面半透半反镜组成，因后者形状酷似“鸟盆”而得名。图像光线从位于镜腿或镜框上方的微型显示器发出，经分光镜反射至球面镜，再由球面镜反射并放大后进入人眼。凭借成熟的供应链、相对较低的制造成本以及优良的成像质量，Birdbath 方案迅速成为 XREAL、Rokid 等头部品牌的主力选择，成功开辟了“AR 观影设备”或“便携智能巨幕”这一细分市场。例如 XREAL Air 2 Ultra，实现了 52 度的视场角以及仅 80 克的重量，为用户提供了随时随地的大屏观影体验。

图表 5：Birdbath 方案技术原理



资料来源：艾瑞咨询，五矿证券研究所

图表 6：Birdbath 典型产品-XREAL Air 2 Ultra



资料来源：VR52，五矿证券研究所

然而 Birdbath 也有致命短板，它的核心缺陷是极低的透光率。由于光路中存在多次反射和透

射，外界环境光进入人眼的过程中会发生严重衰减，导致其透光率通常低于 30%。这意味着佩戴者看到的现实世界会显著变暗，如同戴着一副深色太阳镜，严重影响了在室内或非强光环境下的使用。且光学效率低下，显示光在到达人眼的过程中同样面临巨大损耗，光学效率仅为 15% 左右。这要求微显示屏必须具备极高的亮度，从而增加了功耗和散热压力。Birdbath 的商业成功，验证了市场对“可穿戴大屏”的强烈需求，但并未验证其作为 AR 终极方案的可行性。它所开创的“AR 观影仪”品类，满足的是媒体消费的需求，而非真正 AR 所追求的实时信息交互。其在透光率上的根本缺陷，决定了它只是一个过渡性的技术，是行业在光波导成本与性能达到平衡前的“权宜之计”。

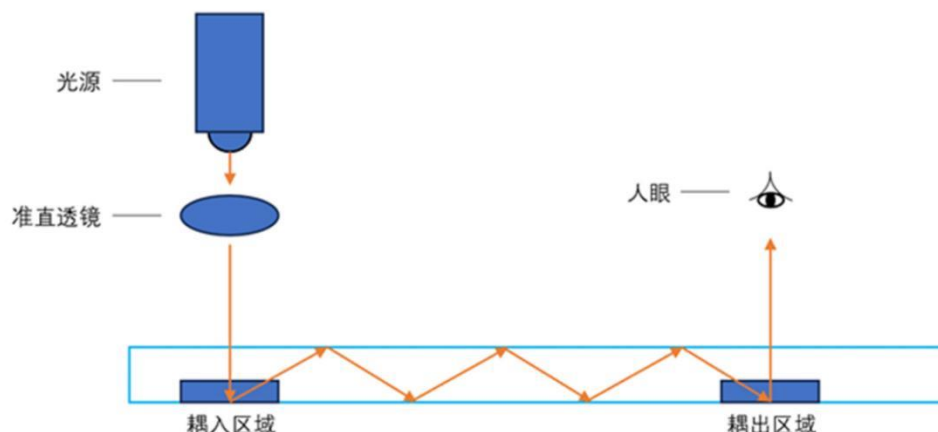
综上所述，棱镜与自由曲面方案均受制于传统几何光学的物理规律，导致光学模组的体积和厚度难以压缩，使其在消费级市场几乎没有竞争力。Birdbath 方案则是在成像质量、成本与形态之间做出的市场化妥协，其优良的显示效果成功吸引了初期用户，但其作为代价的极低透光率和依然笨重的体积，使其应用场景高度局限在个人娱乐领域，无法胜任全天候、多场景的“真 AR”使命。

二、光波导：通向“日常佩戴”的必由之路

面对传统方案的固有缺陷，光波导（Waveguide）技术应运而生，并被业界普遍视为实现终极 AR 眼镜形态的唯一可行路径。其核心思想是将微显示器发出的光线“耦合”进一块极薄的透明基底（镜片）中，通过全内反射原理在镜片内部传输，最后再通过特定的“耦出”结构将光线导入人眼。光波导技术的核心优势可概括为以下几点：

- 1. 极致轻薄的形态：**光波导技术将光路折叠并约束在厚度不足 3mm（几何光波导甚至可低于 2mm）的镜片内部，彻底打破了光学模组体积与镜片面积的强耦合关系。这使得 AR 眼镜的最终形态可以无限趋近于普通眼镜，是实现“全天候无感佩戴”的物理基础。
- 2. 超高的透光率：**由于人眼是通过镜片基底直接观察现实世界，而非透过复杂的半透镜结构，光波导的透光率可以轻松超过 85%，几乎与高品质光学镜片无异。
- 3. 广阔的视场角潜力：**光波导方案技术路线具备极佳的可扩展性，通过采用更高折射率的基底材料，光波导理论上可在单层镜片中实现超过 70 度甚至 80 度的超大视场角。
- 4. 极高的均匀度：**当前主流 AR 光波导部分存在视场边缘亮度衰减、色彩偏移问题。碳化硅（SiC）光波导凭借高折射率（2.6 以上）与优异稳定性，可减少光传播差异，在 50 度视场内消除暗角、彩边，实现亮度与色彩一致，均匀度优于传统方案。

图表 7：波导型近眼显示器光路图



资料来源：艾邦 ARAI 眼镜咨询，五矿证券研究所

光波导的核心价值并非某一项参数的极致表现，而是整套系统的综合能力。既要同时兼顾亮度、透明度、均匀性与色彩控制这些关键指标，也得确保技术具备可量产、可交付的落地条件。正是基于以上无可比拟的综合优势，全球范围内的科技巨头，包括微软、Meta，以及国内的雷鸟、魅族等领先品牌，均已将光波导作为其下一代 AR 产品的核心技术路线进行战略布局。行业已经形成高度共识：光波导技术的成熟度与成本控制，将直接决定消费级 AR 市场爆发的时间点。

2.1 几何阵列光波导：成像效果优秀，量产难度较大

基本原理：基于几何光学的全反射与扩瞳

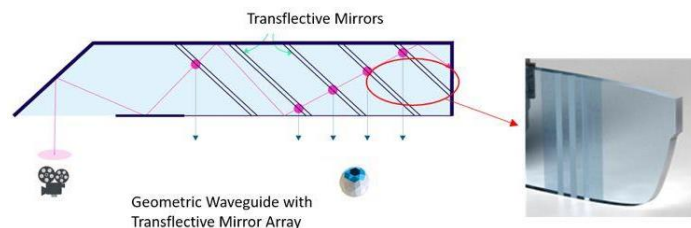
阵列光波导又称几何光波导，它采用光学镀膜、玻璃研磨、抛光与多层贴合工艺，基于几何光学的全反射原理，精密加工多个半反镜面构成导光路径，通过阵列反射镜堆叠实现图像的输出和动眼框的扩大。

一维扩瞳：反射面/棱镜将光束耦合入波导，经过多次全反射后，进入半透半反镜面阵列。每个镜面将部分光线朝人眼方向反射出波导，其余光线经镜面透射，继续在波导中前进至遇到下一个半透半反镜面。不断重复上面的“反射-透射”过程，直到镜面阵列里的最后一个镜面将剩下的全部光反射出波导进入人眼，从而实现光在水平方向的扩瞳。一维扩瞳阵列光波导能将 EyeBox 从 4mm 扩大到 10mm+，且杂散光少，光线调制均匀，成像质量、色彩以及对对比度水平较高。

在一维扩瞳阵列光波导产品中，光机体积与产品的 FOV（视场角）直接正相关，FOV 越大，光学模组体积越大，基于该局限，二维阵列光波导方案应运而生，解决了一维扩瞳阵列光波导光机体积与 FOV、EYEBOX 之间的矛盾。

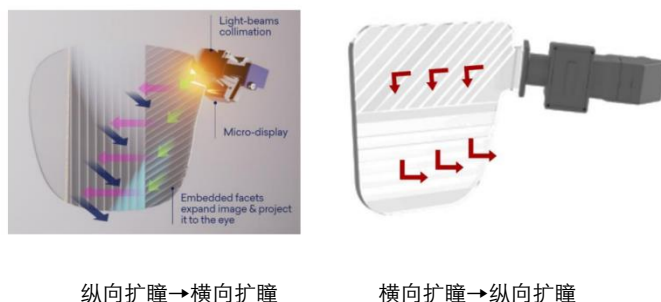
二维扩瞳：反射面/棱镜将光束耦合入波导，经过多次全反射后，依次通过第一半透半反镜面阵列和第二半透半反镜面阵列，第一个区域实现光在一个方向的扩瞳，第二个区域实现光在另一个方向的扩瞳，从而实现光在垂直和水平双向扩瞳效果，显著减少投影光机体积的同时，增大视场角大小。

图表 8：列阵光波导原理示意图（一维扩瞳）



资料来源：Rokid 技术丛林《一文看懂主流 AR 眼镜的核心显示技术光波导》，五矿证券研究所

图表 9：列阵光波导原理示意图（二维扩瞳）



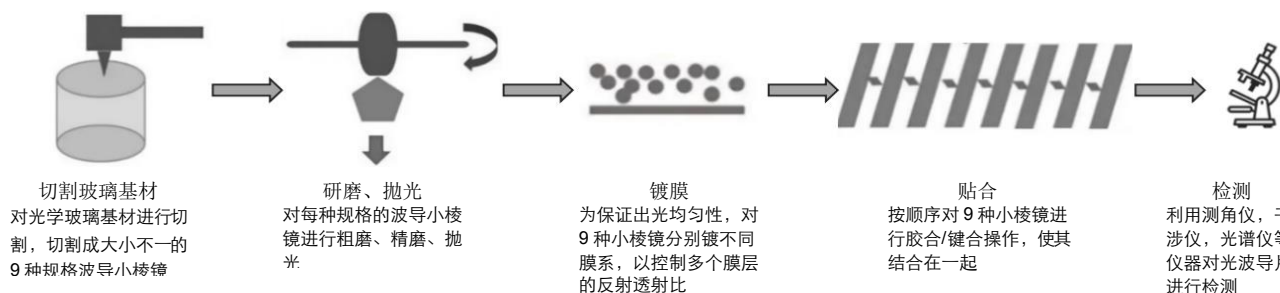
资料来源：MicroDisplay《一文看透几种 AR 光波导方案原理、制程、难点、优势及主要玩家》，五矿证券研究所

优势方面，阵列光波导除了拥有光波导共有的轻薄化优势外，相比于已量产的表面浮雕光栅衍射光波导，其成像效果更为优秀（杂散光少、色彩均匀、EyeBox&视场角较大、分辨率高），且几乎无漏光问题（1%-5%），且光损较低，可以减小光机功耗增加续航。

工艺流程与核心难点：高精密镀膜与贴合技术

阵列光波导采用传统的光学冷加工工艺，加工流程主要是研磨、抛光、镀膜和胶合。首先通过切割玻璃基材获得各种规格的波导小棱镜，然后对小棱镜进行粗磨、精磨与抛光，之后在小棱镜上分别镀不同膜系的薄膜获得不同的反射/透射比，最后对小棱镜进行胶合将它固定为表面光滑的波导片，并通过测角仪、干涉仪等仪器对波导片进行检测。

图表 10：阵列光波导工艺流程



资料来源：Wellsenn XR，艾邦 AR/VR 网，五矿证券研究所

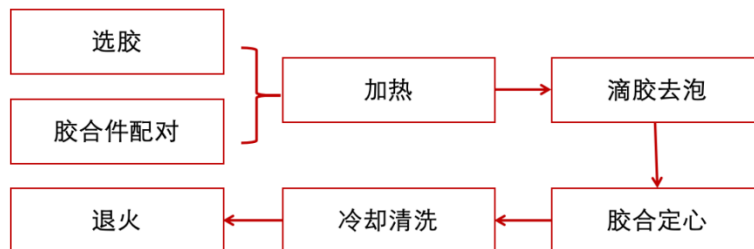
阵列光波导的镀膜工艺存在严苛技术挑战。半透半反镜面阵列需精准调控各镜面反射 / 透射比 (R/T)，因光传播存在能量损耗，需通过差异化 R/T 设计保障动眼框范围内出光均匀性，而膜层厚度以纳米级为控制尺度，对精度把控要求极高；同时，几何波导中传播的光多为偏振光，致使单个玻璃基材上的高精密镀膜层数可能达数十层，进一步放大了镀膜工艺的复杂度与良率管控难度。

贴合工艺：两类工艺原理及键合的更优特性

贴合工艺主要分为胶合与键合两大类。

1) **胶合技术**是指两个或两个以上的光学零件，在彼此吻合的光学表面用光学胶或光胶的方法，按照一定技术要求黏结成为光学部件的工艺。主要通过光学材料与光学胶之间的机械结合、物理吸附、静电引力、互相扩散及化学键作用产生粘结力来实现光学零件的结合，其结合力与胶合材料、光学材料相关。

图表 11：胶合工艺流程图

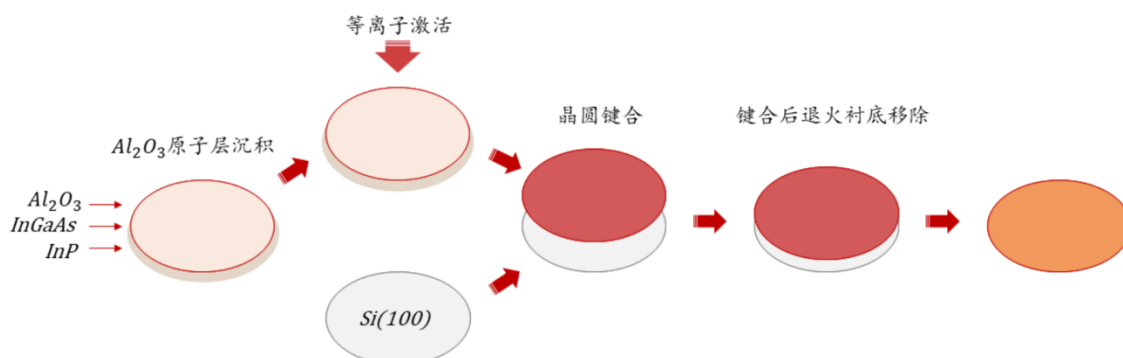


资料来源：Wellsenn XR，五矿证券研究所

胶合工艺有它的固有缺陷。①成像质量受限：高分子胶黏剂固化易引入流平性差、固化不完全、折射率与收缩系数差异大等问题，引发杂散光、偏色等显示缺陷；②光学胶匹配度问题：大视场角 (FOV) 波导对玻璃基材和光学胶的折射率匹配要求高，但大折射率光学胶稀缺且易与基材不兼容；③寿命问题：胶合层长期暴露于环境中，易因老化、收缩、开裂、变色等影响显示效果和产品寿命。

2) 键合技术是通过物理或化学作用力将两个固体表面连接，形成具备一定力学、热学、电学或光学特性的键合界面。其中，分子键合工艺在分子层面使贴合层形成稳定分子键，借助分子作用力实现贴合面的紧密平整结合，从而增强键合强度、提升贴合面平整度、减小相对间距，有利于提高产品键合良率与显示效果。此外，分子键合采用自动化设备，可同时完成多批次、大批量生产，显著提升生产良率，成为二维扩瞳产品实现技术突破和量产的重要工艺基础。

图表 12：键合工艺流程图



资料来源：Wellsenn XR，五矿证券研究所

分子键合虽有优势，但工艺流程繁冗，且镀膜后的镜面需层层擦起粘合后按特定角度切割，镜面间的平行度及切割角度的微小偏差都会直接影响成像质量。

多工艺累积的带来了对总良率的挑战。阵列光波导工艺涉及数十步流程，即使单步工艺良率较高，多步骤结合后的总良率仍面临巨大挑战。任何一步工艺失败都可能导致成像瑕疵（如背景黑色条纹、出光亮度不均匀、鬼影等），进一步增加了生产控制难度。

总体来讲，由于关键步骤自动化开发程度不足、多工艺良率叠加导致整体良率不高等问题，目前阵列光波导技术的实际应用仍然难度较大。

2.2 衍射光波导：主流发展趋势，工艺升级提升性能

随着增强现实（AR）技术从工业应用向消费级市场加速渗透，光学显示系统作为决定用户体验与产品形态的核心环节，其技术路线的选择至关重要。在棱镜、自由曲面、Birdbath、几何光波导等多种方案的竞争中，表面浮雕衍射光波导（Surface Relief Grating, SRG）凭借其在性能、形态与量产可行性之间的卓越平衡，正成为驱动消费级 AR 眼镜走向轻量化、日常化的主流技术路径。

表面浮雕光波导（SRG）：平衡性能与量产的最优解

表面浮雕衍射光波导是一种先进的衍射光学元件（Diffractive Optical Element, DOE），其核心原理是在高折射率的透明基底（如玻璃、树脂或碳化硅）表面，通过纳米压印或蚀刻工艺制造出具有周期性排布的纳米级凹槽结构，即“光栅”。当光线与这些微观结构相互作用时，会发生衍射现象，从而实现了对光线传播方向的精确调控。这一原理与依赖半透半反镜面阵列的几何（阵列）光波导以及利用材料内部折射率周期性调制的体全息光波导（VHG）在物理机制上存在本质区别。

SRG 方案的核心优势体现在以下几个方面：

极致轻薄的形态：SRG 光波导的厚度可控制在 3mm 以内，甚至小于 2mm，使其成为当前唯一能够实现 AR 眼镜外观接近普通眼镜形态的技术解决方案。它直接解决了 Birdbath、自

由曲面等方案固有的体积庞大、形态笨重的问题，是实现“全天候无感佩戴”的前提。

二维出瞳扩展（2D EPE）能力：SRG 方案最关键的技术突破在于其能够高效实现二维出瞳扩展。这意味着用户的瞳孔可以在一个较大的区域内移动，而不会出现画面丢失或不完整的现象，极大地提升了佩戴的容错率和舒适度，并能适配不同用户的脸型和瞳距，这是传统一维扩瞳的几何光波导方案难以比拟的优势。

明确的市场主流地位：凭借上述优势，SRG 方案已被行业广泛采纳，成为当前及下一代消费级 AR 眼镜的主流选择。国际巨头如微软（HoloLens）、Snap（Spectacles）以及国内领军品牌如雷鸟创新、星纪魅族等均在其旗舰产品中应用了 SRG 技术。相较之下，几何光波导虽成像质量高、无色散伪影，但其制造工艺极其复杂，成本高昂，难以满足大众市场的需求；而 VHG 技术虽理论前景广阔，但受限於光敏材料的性能瓶颈，技术成熟度相对较低，尚未进入大规模商业化阶段。

技术原理与核心优势

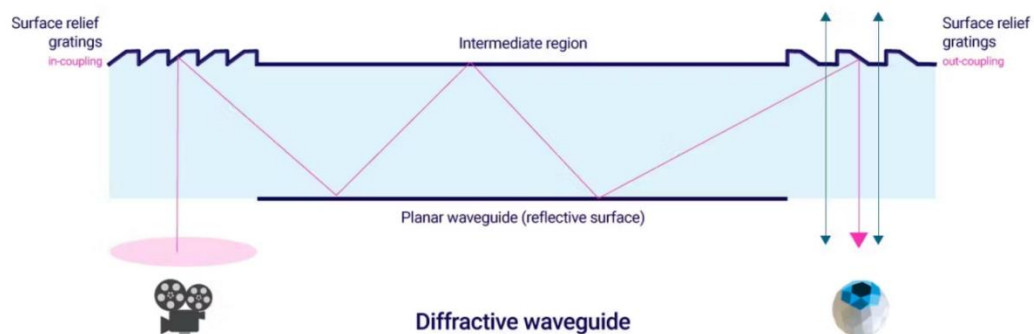
表面浮雕衍射光波导的工作流程是一个精妙的光学耦合与传输过程，它将微型显示器（光引擎）发出的图像光线高效地导入人眼。

耦入（In-Coupling）：源自 Micro-LED 或 LCoS 等微显示器的图像光束，首先经过准直系统变为平行光，然后以特定角度入射到波导片表面的“耦入光栅”区域。该区域的光栅结构发生衍射，将入射光束以一个大于全反射临界角的角度偏折，使其被“捕获”在波导基底内部，并通过全内反射（Total Internal Reflection, TIR）现象向前传播。

传输与扩展（Propagation & Expansion）：被捕获的光束在波导片的上下两个表面之间以来回反射的方式传输。当光束传播至“扩展光栅”区域时，该区域的光栅会对光束进行衍射，将其沿第一个维度（例如垂直方向）进行复制和扩展，从而扩大光束的覆盖范围。

耦出（Out-Coupling）：经过扩展的光束最终到达位于人眼正前方的“耦出光栅”区域。光束每次在耦出光栅表面发生全反射时，光栅结构都会衍射出一部分光线，使其传播方向改变，不再满足全反射条件，从而射出波导并进入人眼。与此同时，剩余大部分光线则继续在波导内向前传播。这个“部分出射、部分前行”的过程在整个耦出光栅区域内连续发生，从而实现了光束在第二个维度（例如水平方向）的扩展，最终在人眼位置形成一个面积远大于初始光束的均匀照明区域，即眼动范围。

图表 13：衍射光波导工作原理示意图



资料来源：hackernoon，五矿证券研究所

SRG 波导的设计并非简单的光栅图案复制，而是一个高度复杂的多物理域、多目标系统优化工程。最终的成像均匀度、光效率、视场角和色差等关键性能，是由耦入、扩展、耦出三个区域所有光栅的参数（包括周期、深度、占空比、倾斜角等）与基底材料折射率之间复杂的相互作用共同决定的。这种设计复杂性催生了对专业光学设计与仿真软件的强依赖，使得拥有自主知识产权的、能够进行全链路仿真的设计平台成为企业的核心竞争力与技术壁垒。

核心制造工艺

表面浮雕光栅的制造是 AR 光波导产业链中技术壁垒最高的环节之一，其工艺选择直接决定了产品的成本、良率与光学性能。目前，行业主要形成了光刻+干法刻蚀、纳米压印以及纳米压印+干法刻蚀工艺三条技术路线。

图表 14：SRG 三种工艺对比

实现方案	工艺原理	核心优势	主要挑战	光栅结构
光刻+干法刻蚀 (含 EBL+干法刻蚀、DUV+干法刻蚀)	1.EBL+干法刻蚀：聚焦电子束直写光刻胶形成纳米图案，经干法刻蚀将图案转移至高折基底，去除残留胶和掩膜层制得光栅模板，支持多步光刻刻蚀实现多齿形加工 2.DUV+干法刻蚀：通过 193nm/248nm 深紫外光经掩膜版投影曝光光刻胶，干法刻蚀转移图案至高折基底，去除残留后形成光栅	1.直接在高折基底加工，光栅材料折射率 $R_i > 2.0$ ，无高折胶限制 2.光栅精度高、侧壁陡直、表面粗糙度低，环境可靠性好 3.EBL 可加工线宽 $< 40\text{nm}$ 结构，DUV 为大面积投影曝光，生产效率高、材料利用率优 4.EBL 可在同片 wafer 加工直齿、斜齿、闪耀、菱形等多种齿形	1.EBL 为逐点扫描，加工速度慢、成本极高，仅适用于模板制作 2.DUV 设备昂贵且购买困难，需高精度掩膜版，加工成本高 3.DUV 大规模生产时，大尺度斜齿齿形均一性差，仅适用于直齿加工	1.EBL 可加工直齿、斜齿、闪耀、菱形等多种齿形的表面浮雕光栅 2.DUV 主要加工直齿表面浮雕光栅，齿形精度高、侧壁陡直
纳米压印工艺 (UV-NIL 为主)	以光刻+干法刻蚀制得的精密模板为基础，经软膜转印得到子版；将子版压印在高折玻璃表面的高折胶涂层上，UV 光固化后脱模，在胶层形成光栅结构，核心为机械压印的微纳图案复制	1.不受光学衍射限制，理论可达亚纳米分辨率，大面积图形复制精度高 2.可加工直齿、斜齿、闪耀、台阶等几乎所有光栅齿形，设计自由度极高 3.设备便宜、工序简单，加工成本低，易批量操作 4.拼版技术提升材料利用率和机台效率，是消费级 AR 首选方案	1.高度依赖高折压印胶，市面胶材折射率普遍 < 2.0 ，耐候性和可靠性差，无法满足高端需求 2.高折胶的性能提升依赖供应商研发突破	可加工直齿、斜齿、闪耀、台阶、菱形、一维/二维渐变等几乎所有类型的光栅，为胶层表面浮雕结构
纳米压印+干法刻蚀工艺	以低折树脂为牺牲层，纳米压印形成胶层图案后作为掩膜，通过干法刻蚀将图案穿透残胶、硬质掩膜层转移至下方高折基底层，最后去除残留聚合物和压印胶完成制备	1.突破压印胶折射率上限，光栅材料 $R_i > 2.0$ ，提升产品设计自由度 2.支持高折玻璃、铌酸锂等多种基底，光栅材料选择广，产品可靠性好 3.无需复杂光学系统和高成本掩膜板，加工成本远低于 DUV+干法刻蚀 4.拼版多 Die 压印+同步刻蚀，生产效率不低于 DUV+干法刻蚀，适合大规模量产	1.需匹配刻蚀选择比合适的高折基底材料与压印胶 2.刻蚀参数控制难度大，直接影响光栅齿形精度 3.残胶的厚度和均一性对光栅质量影响显著	主要加工直齿光栅，光栅结构为高折基底表面的浮雕结构，适用于中高端 AR 产品

资料来源：舜宇奥来技术，五矿证券研究所

从目前 SRG 的实现方案来看，都存在较为明显的缺陷。EBL+干法刻蚀方案能实现多种齿形加工，但无法实现量产；DUV+干法刻蚀方案和 NIL+干法刻蚀方案能够实现高品质光栅的大规模生产。目前，直齿光栅的加工工艺已趋于成熟，但斜齿光栅和闪耀光栅在加工效率及齿形均匀性方面仍存在显著挑战；NIL 方案能实现多种齿形的大规模生产，但高折胶的折射率和可靠性极大限制了 NIL 技术在 AR 上的发展。

综合来看，衍射光波导想要进一步发展主要集中在 wafer 尺度上实现斜齿或者闪耀光栅的高效及均匀刻蚀，以及高折胶在折射率和可靠性上的突破。另外，多维度渐变齿高的设计越来越受关注，如何大规模加工多维度渐变齿高对于刻蚀工艺来说是另外一大挑战。

中国 AR 产业在全球竞争中具备一定的供应链和市场需求基础。首先，中国拥有全球最完整、最高效的消费电子供应链，为 AR 产品的快速迭代和成本控制提供了坚实基础。其次，本土企业在光波导设计与制造等核心环节已取得关键技术突破，与国际先进水平的差距正在迅速缩小。更重要的是，庞大的国内消费市场对新技术的接纳度高，为产品提供了广阔的应用场景和宝贵的数据反馈。最后，国内厂商正积极将本土化的 AI 大模型能力深度集成到 AR 眼镜中，创造出海外品牌短期内难以复制的差异化智能交互体验。我们认为，这一系列优势使得本土品牌能够与本土设计和制造伙伴紧密合作，快速推出针对中国市场优化的、具有全球竞争力的新产品，有望在全球消费级 AR 市场复现智能手机时代的崛起路径，构成了 AR 光波导领域一个值得长期关注的投资主线。

体全息光波导（VHG）：理论优势明显，尚处发展初期

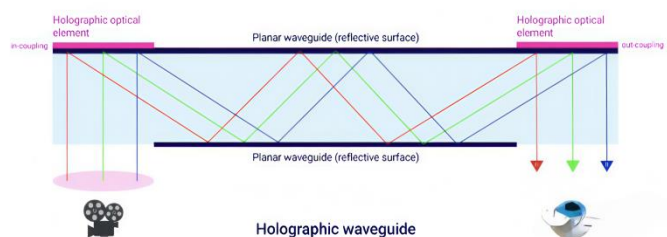
技术原理与分类

衍射光波导就是利用光栅的衍射特性来设计“光路”，让光在设计好的路径上传播，将微投影系统发出的光导入人眼。衍射光栅，这一具有周期性结构的光学元件是衍射光波导最为核心的部分，根据光栅类型的不同，又可以将衍射光波导分为两类：表面浮雕光栅波导和体全息衍射光波导。

体全息衍射光波导方案（Volume Hologram Grating, VHG）采用体全息衍射光栅作为波导的耦入和耦出器件，体全息衍射光栅是一种具有周期结构的光学元件，其制备通常通过双光束全息曝光的方式实现。

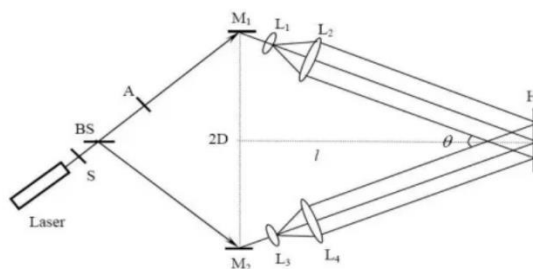
具体而言，通过将两束激光器（Laser）发出的光束经分束镜（BS）分光后，分别通过扩束镜（L1、L3）扩大光束，并通过准直透镜（L2、L4）将光束准直为平行光，两束平行光以一定夹角 θ 照射到全息感光胶片（H）上，产生干涉条纹。该干涉条纹以折射率变化的形式记录在感光材料中，从而形成具有周期性结构的光栅。这种干涉条纹的周期由两束光的夹角 θ 决定，进而决定了光栅的周期结构。通过调整材料的折射率、折射率调制因子及厚度等参数，可以优化体全息光栅的衍射效率和光学性能。

图表 15：体全息光栅原理图



资料来源：先进光子学，五矿证券研究所

图表 16：体全息光栅的记录光路



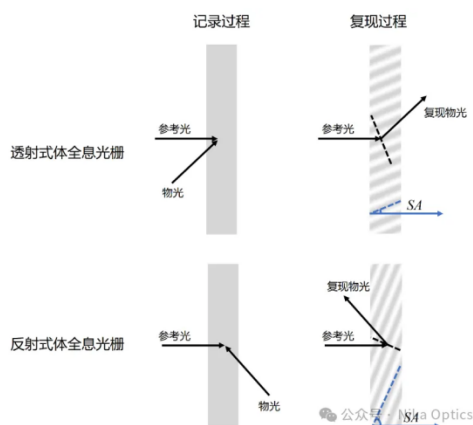
资料来源：三极光电，五矿证券研究所

用于制备体全息的两束光分别称为物光（Object Beam）和参考光（Reference Beam）。两束光在感光材料内部干涉，形成稳定的三维周期性光强分布，通过光化学反应将该分布转化为感光材料内部物质的周期性分布，从而形成体全息光栅的条纹结构。

这种周期性分布体现为消光系数或折射率的三维周期性变化。根据参考光与复现物光的相对方向，体全息光栅可分为透射型和反射型两类。透射型光栅的条纹倾角较小，而反射型光栅的条纹倾角较大。

体全息光栅的微结构在体光栅的内部，所以其衍射主要是材料的体效应。当入射光满足布拉格条件时，体全息光栅会有极高的衍射效率，而如果偏离了布拉格条件，衍射效率则会迅速下降，这个特性使体全息光栅具有明显的角度和波长选择性。

图表 17：体全息光栅的记录和复现过程示意图



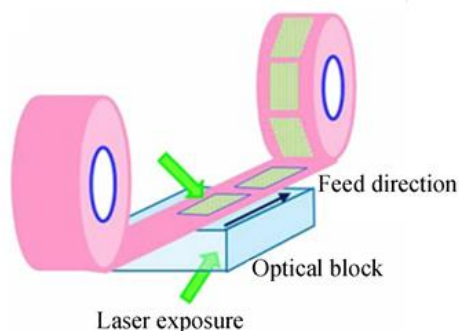
资料来源：尼卡光学 Nikahood，五矿证券研究所

核心制造工艺：卷对卷与印刷工艺

Sony 卷对卷工艺

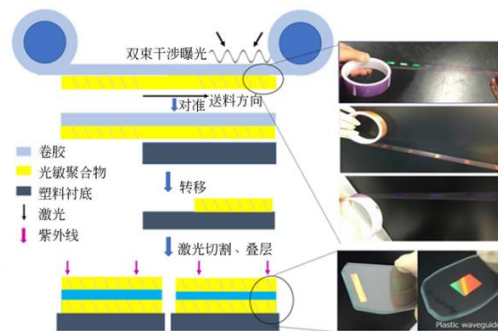
Sony 公司制备体全息衍射光波导的卷对卷工艺是一种高效、大规模生产的关键技术。该工艺首先通过双束干涉曝光法在光敏聚合物膜上形成体全息图案，随后通过注射成型形成高质量的环烯烃聚合物塑料波导。为确保光学性能，波导的翘曲和厚度变化需严格控制，翘曲度小于 $5\mu\text{m}$ ，厚度变化小于 $1\mu\text{m}$ 。随后，全息波导膜与塑料波导对准贴合，切割并完成配色封装，以实现多色波导的集成。塑料基底的平坦性对加工过程至关重要，是实现高质量波导的关键挑战。

图表 18：体全息光栅原理图



资料来源：姜玉婷、张毅等《增强现实近眼显示设备中光波导元件的研究进展》，五矿证券研究所

图表 19：体全息光栅的记录光路



资料来源：姜玉婷、张毅等《增强现实近眼显示设备中光波导元件的研究进展》，五矿证券研究所

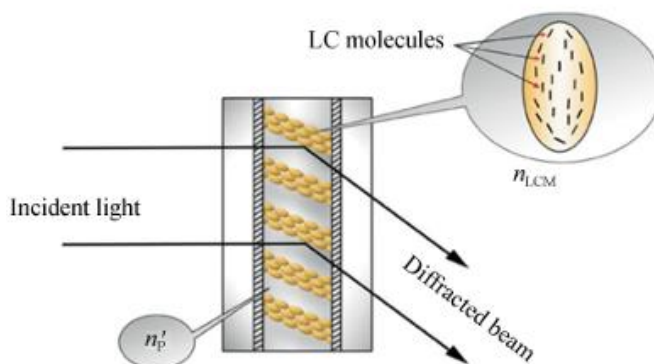
DigiLens 体全息衍射光波导印刷工艺

DigiLens 公司开发了一种新的体全息衍射光波导印刷工艺，该工艺具有灵活性高、可实现数字化模板设计的优点，适合大规模生产。该工艺主要分为母模板的制作和波导的印刷两个部分。其核心材料是超高折射率全息光聚合物，主要由光聚合物和液晶组成。通过设计不同的体全息衍射光波导，可以获得不同的模板，并通过印刷技术实现不同结构的体全息衍射光波导的制造。

在制造过程中，全息图的记录通常通过调整计算机生成的衍射元件来设计图案，并在高光强区域引发光聚合，形成聚合链，单体会扩散并连接，液晶分子则扩散到低强度区域，最终形成固体全息层。这种工艺能够实现高透明度和低雾度的波导，适用于多种光学功能的集成。

DigiLens 公司还提出并优化了一种以可切换布拉格光栅 (Switchable Bragg Grating, SBG) 为主的衍射光波导方案，该方案在保证衍射效率的同时为设计加工提供了更大的自由度。可切换布拉格光栅利用平行玻璃板作为电极，中间夹有光聚合物和液晶材料，通过施加电压改变液晶分子方向，从而实现折射率的调制，从而实现衍射效率的调制。这种技术为设计和加工提供了更大的自由度，适用于多层光栅波导的入耦合处光栅的开关，提高了视场角。

图表 20：体全息光栅的记录和复现过程示意图



资料来源：姜玉婷、张毅等《增强现实近眼显示设备中光波导元件的研究进展》，五矿证券研究所

技术瓶颈与挑战

理论上在满足布拉格条件时，VHG 的衍射效率可达到 100%，同时可减少正面漏光的现象，

并且无需复杂的光刻或纳米压印等工艺流程，只需要自动化曝光即可，生产速度更快，量产成本更低。但该技术目前存在的挑战有：

(1) 光敏材料的折射率调制度在 10^{-2} 量级，很难进一步提高，且在可见光全光谱范围内的高灵敏响应材料的生产和供应不充足。

(2) 全息波导曝光和生产过程对环境稳定性要求非常严格，湿度、温度和空气流动等都会影响波导的性能。

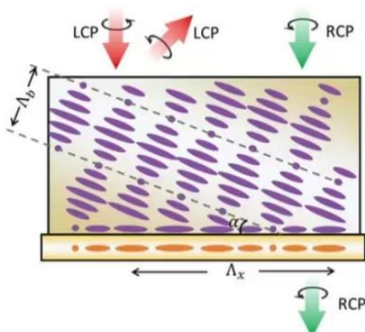
(3) VHG 对角度和波长的强选择性导致响应带宽较低，对于实现大 FOV 的全彩色显示有技术难度，目前 VHG 在视场角、光效率、清晰度及色彩均匀性等方面尚未达到 SRG 波导的水平，仍需业内对该技术进行持续探索与研发。

偏振体全息光波导 (PVG)：突破视场角限制的新路径

偏振体光栅 (Polarization Volume Grating, PVG) 是一种偏振选择性全息光学元件，其核心结构由倾斜的胆甾型液晶 (Cholesteric Liquid Crystal, CLC) 构成，液晶分子沿螺旋轴方向旋转，形成周期性排列的三维结构。该结构赋予 PVG 独特的偏振选择特性，能够选择性地衍射与螺旋扭转方向一致的圆偏振光 (如左旋圆偏振光 LCP)，而透射相反的圆偏振光 (如右旋圆偏振光 RCP)。其衍射效率随周期数的增加而提升，但最终趋于饱和。

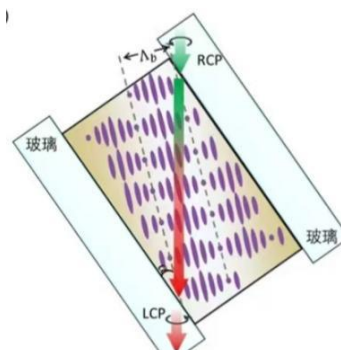
然而，当入射光方向接近布拉格平面时，PVG 的布拉格条件不再成立，其功能从光栅转变为波片，表现出偏振转换特性。例如，在满足半波条件时，PVG 可将右旋圆偏振光 (RCP) 转换为左旋圆偏振光 (LCP)。这种反常的偏振转换现象为 PVG 在波导显示中的应用提供了新的设计维度。

图表 21: PVG 的偏振选择特性



资料来源：Light Science Applications，五矿证券研究所

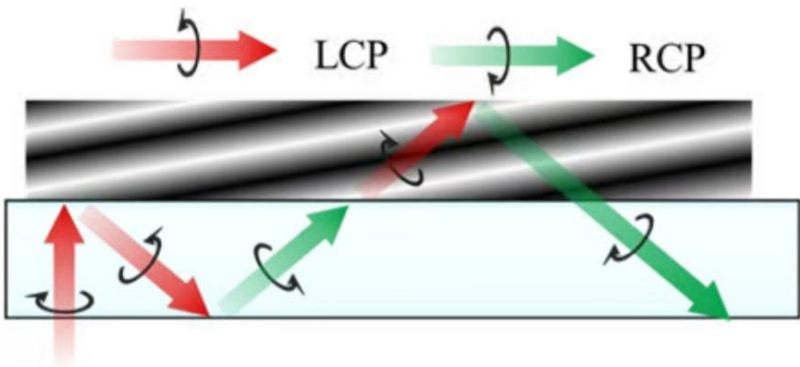
图表 22: PVG 的反常偏振选择特性



资料来源：Light Science Applications，五矿证券研究所

在波导显示系统中，PVG 作为内耦合器件具有显著优势。其偏振选择性与全反射 (Total Internal Reflection, TIR) 的结合，使得入射光在波导内传播时保持偏振状态，从而提高耦合效率和视场均匀性。具体而言，入射光在 PVG 与波导界面发生多次相互作用，通过偏振转换和全反射的协同作用，实现光在波导内的高效传播。这种机制不仅提升了耦合效率，还增强了视场的均匀性和眼盒连续性。

图表 23：PVG 作为波导显示器入射耦合器的工作原理



资料来源：Light Science Applications，五矿证券研究所

PVG 技术落地难点：材料、工艺及量产等核心挑战

PVG 落地目前仍面临许多困难。**材料层面**，核心依赖的光致液晶材料存在光取向锚定能不足、高温下分子取向易偏移、温湿度变化导致取向层氧化、折射率调制度与长期稳定性难以兼顾等问题，且高折射率调制度材料的耐候性与寿命仍需突破。**工艺方面**，湿法涂布与全息曝光中的薄膜应力易引发波导片翘曲、衍射效率下降，曝光系统的偏振干涉精度与一致性控制难度大，多工序（旋涂、烘焙、曝光、固化等）的参数匹配和良率提升挑战突出，全彩显示所需的多色光栅叠加工艺复杂且易出现串扰。**量产阶段**，PVG 正处于从中试到规模化爬坡的关键期，核心工序的工艺规范与设备稳定性有待固化，大面积加工时的图案均匀性、批次间一致性难以保证，且专用生产设备与检测仪器的产业链成熟度不足，导致量产成本居高不下。环境可靠性上，温度变化易使光栅周期与折射率调制结构改变，造成衍射效率波动和色彩漂移，户外强光环境下的光稳定性与抗老化能力仍需强化。此外，理论模型与设计工具尚不完善，视场角扩展（主流 30° - 40°）、复杂场景下的光能利用率优化等技术瓶颈也制约其向消费级市场大规模渗透。

图表 24：主流光波导技术方案对比

参数类型	自由曲面	Birdbath	几何光波导	表面浮雕光波导	体全息衍射光波导
技术壁垒	++	++	++++	++++	++++
厚度	>8mm	~8mm	<2mm	<3mm	<3mm
视场角	20-40°	40-60°	25-50°	30-60° (SiC 可达 70° +)	单层 25-40°，多层可达 80° +
透光率	40-70%	<50%	>80%	>80%	>85%
光学效率	20-40%	15-20%	~5% (二维)	0.1-1%	理论光效高，系统光效低
瓶颈	厚度较大，有反射伪影	透光率低，亮度较低	二维扩瞳量产困难，工艺复杂，成本高	彩虹效应，光损耗大	光敏材料限制，技术成熟度低，色彩与均匀性待提升
量产成熟度	较高	较高	较低	快速提升中	较低

资料来源：五矿证券研究所整理

当前各类光波导方案的性能升级，仍受限于传统玻璃、树脂等基底材料的折射率、热导率等本征特性，视场角扩大、彩虹纹抑制、散热优化等核心问题难以从材料层面得到根本性解决。在此背景下，碳化硅（SiC）凭借其超高折射率、高热导率的独特物理属性，成为突破光波导材料性能瓶颈、实现技术进一步升级的核心方向，被业界视作适配下一代消费级 AR 眼镜的理想光波导基底材料。

三、碳化硅（SiC）：光波导技术升级的核心基底材料

3.1 核心优势：高折射率与高热导率破解光波导核心痛点

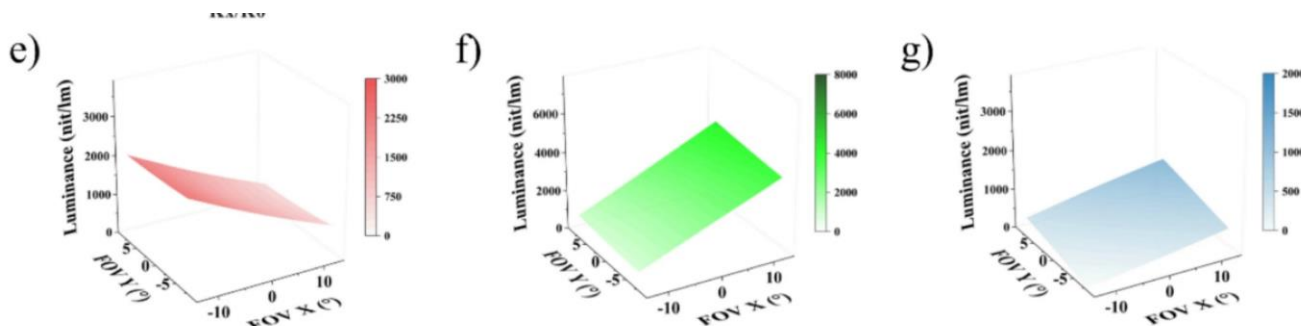
碳化硅（SiC）凭借其独特的高折射率与高热导率两大核心物理特性，被视为解决当前增强现实（AR）眼镜在视场角（FOV）狭窄、图像出现彩虹纹、散热负担重等核心瓶颈的潜力基板材料。然而，其商业化进程仍受制于高昂的综合成本与复杂的加工集成技术，当前仍处于从实验室原型向规模化量产过渡的关键阶段。

核心优势分析——高折射率

碳化硅的折射率可达 2.6 以上，显著高于传统光学玻璃与树脂。高折射率的光学核心价值在于，它可将衍射光栅的周期设计至亚微米级别。这产生了两个直接优势：

首先，是实现超大视场角。更小的光栅周期允许光线在波导内以更大的角度进行全反射和耦出，使得单层 SiC 波导理论上即可支持超过 80 度的全彩视场角（FOV），效果相当于需多层堆叠的玻璃波导方案，为 AR 眼镜的轻薄化与沉浸感体验奠定物理基础。

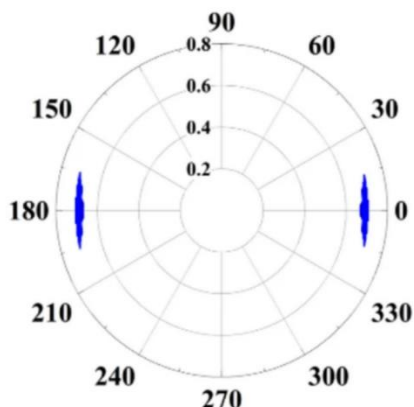
图表 25：SiC 波导于 635（左）、528（中）及 463（右边）纳米波长（三色光）下的在视场角（FOV）与出耦效率



资料来源：SiC diffractive waveguides for augmented reality: single-layer, full-color, rainbow-artifact-free display with vision correction，五矿证券研究所整理

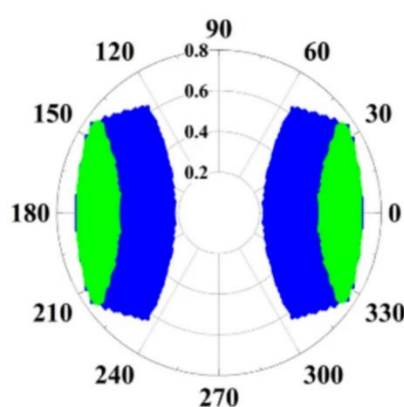
其次是有效抑制彩虹纹。亚微米级光栅能增大环境杂散光的衍射角度，使其偏转出人眼可视范围，从而从原理上显著减轻由光栅色散引起的彩色杂散光现象，提升显示对比度和纯净度。

图表 26: SiC 波导中环境光的衍射



资料来源: SiC diffractive waveguides for augmented reality: single-layer, full-color, rainbow-artifact-free display with vision correction, 五矿证券研究所整理

图表 27: 传统 AR 波导 (n=2.0) 可能导致彩虹伪影

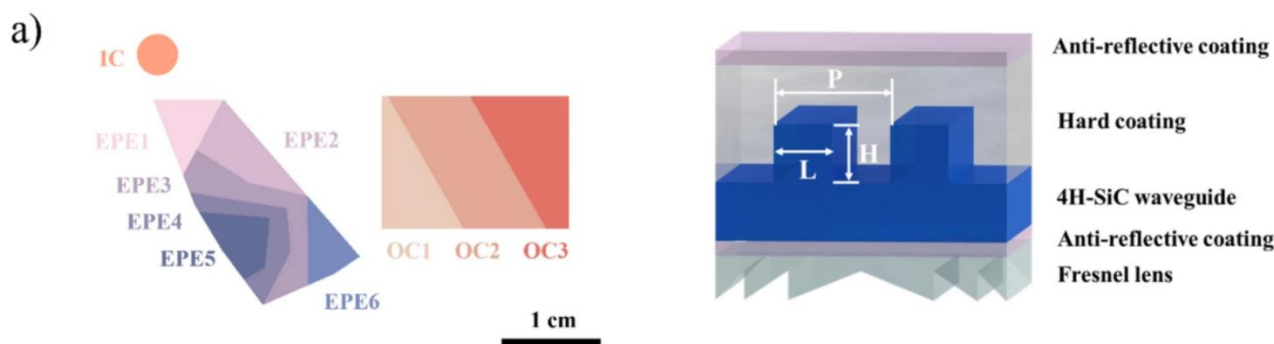


资料来源: SiC diffractive waveguides for augmented reality: single-layer, full-color, rainbow-artifact-free display with vision correction, 五矿证券研究所整理

高热导率:

碳化硅的热导率高达约 $490 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 是玻璃的数百倍。这一特性为其带来了系统级的设计优势: 一方面, 它保障了显示性能的稳定。能够快速导出发光模组 (如 Micro-LED) 产生的集中热量, 避免局部高温导致的亮度衰减、色彩漂移或芯片热降频, 从而支持更高亮度与更稳定的长时间运行。另一方面, 它简化了整机散热设计, 是实现轻量化的关键。高导热性使得波导片本身即可作为主要散热路径, 有望省去传统 AR 眼镜中复杂的主动散热模组 (如风扇、热管) 或厚重的镜腿散热结构, 从而降低设备重量与体积, 推动 AR 眼镜向普通眼镜形态靠拢。

图表 28: SiC 波导布局分布示意图 (左) 和截面图 (右)



资料来源: SiC diffractive waveguides for augmented reality: single-layer, full-color, rainbow-artifact-free display with vision correction, 五矿证券研究所整理
注: 4H-SiC Waveguide” 层, 是散热能力的物理载体。它的高导热性 ($\sim 490 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) 是材料的本征属性。

核心劣势与挑战

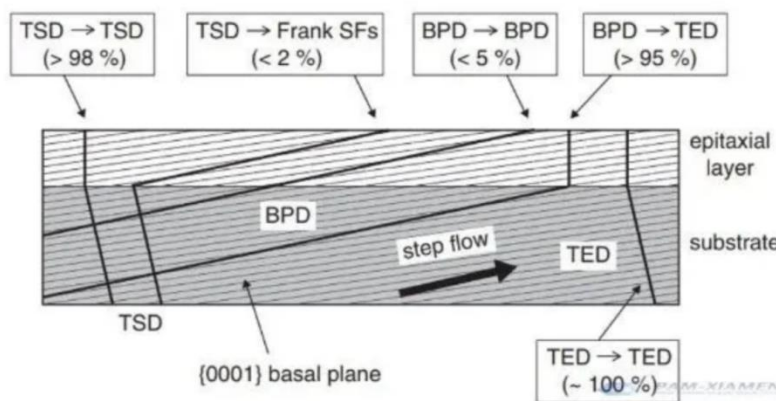
材料与制造成本高:

成本是碳化硅波导迈向消费市场的最大障碍。材料成本方面, 适用于 AR 光波导的必须是高纯度、低缺陷、光学级透明的半绝缘型 SiC 单晶衬底, 其晶体生长技术难度极大、速度慢、良率低, 导致一片 4 英寸晶圆的成本即达数千元人民币量级。制造成本方面, 后续的纳米级光栅加工与镜片成型工序进一步推高了总成本。

加工工艺复杂:

高昂成本的根本原因在于材料本身带来的极端加工挑战。碳化硅是硬脆材料，难以进行纳米级的精密加工：**首先**，在衬底准备阶段，切片、减薄、抛光等传统工序耗时耗材，且易产生裂纹与缺陷。**其次**，在核心的光栅制造阶段，需要在如此坚硬的基底上，通过电子束光刻或纳米压印等工艺，高精度、高一致性地加工出深亚微米周期的三维浮雕结构，对刻蚀工艺和控制要求较高。复杂的全链条工艺导致生产良率提升缓慢，直接阻碍了成本下降。

图表 29：碳化硅外延片缺陷对最终器件对影响



资料来源：PAM-XIAMEN，五矿证券研究所整理

注：在外延生长过程中，衬底中约 98%的 TSD 转化为 TSD，其余转化为 FrankSF；100%的 TED 改成 TED；大约 95%的 BPD 转化为 TED，并维持少量 BPD。TSD 和 TED 对最终碳化硅器件的性能影响很小，但 BPD 会导致器件性能下降。因此人们更加关注 BPD。堆垛缺陷、胡萝卜缺陷、三角形缺陷、坠物等缺陷都是重大缺陷。一旦器件上出现这些缺陷，器件就会无法通过测试，导致良率较低。

3.2 核心挑战：材料成本与加工工艺的产业化壁垒

碳化硅（SiC）镜片发展历程

核心发展主线分为三个阶段：

第一阶段（2020 年以前）为理论与技术萌芽期，SiC 的高折射率与高热导率的光学价值在学术界被初步论证，相关研究主要停留在论文与专利层面。

第二阶段（2020-2024 年）为工程验证与原型突破期，关键技术得以贯通：利用半导体微纳加工工艺在 SiC 上成功制备出亚微米光栅，验证了单层实现超大视场角（FOV>80°）与抑制彩虹纹的可行性。2024 年 9 月，Meta 发布采用碳化硅衍射光波导的概念原型机“Project Orion”，成为该技术从实验室走向产业前沿的标志性事件。

第三阶段（2024 年至今及未来）进入产业攻坚与降本关键期，发展焦点从性能验证全面转向供应链构建、成本控制与规模化工程挑战的解决。

图表 30：碳化硅 AR 镜片发展历史

时间	关键事件
2022 年 4 月	西湖大学仇旻实验室孵化慕德微纳，专注碳化硅光学加工。
2024 年 9 月	发布全球首款单层碳化硅 AR 镜片，重 2.7g，无彩虹纹。
2025-2026 年	12 英寸衬底量产，与舜宇奥来合作，产品供应多家企业。

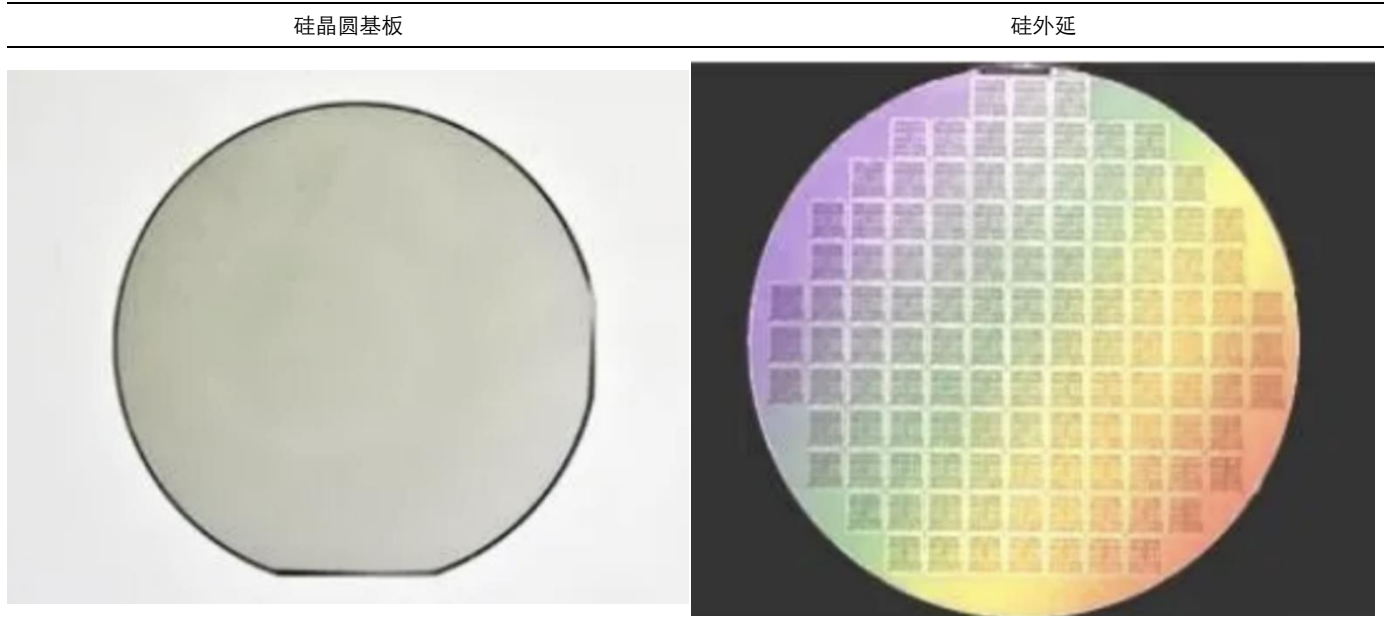
资料来源：百度百科，五矿证券研究所整理

3.3 发展现状与市场格局：从实验室验证到供应链攻坚

国内 SiC 材料龙头企业正积极推动 AR 应用落地。

例如，三安光电的 SiC 衬底已向多家 AR 终端客户送样验证。同时，天岳先进展示了 12 英寸高纯 SiC 衬底，晶盛机电子公司浙江晶瑞也展出了 8 英寸光学级 SiC 衬底。天科合达也推出了 8 英寸光学级碳化硅衬底，并计划于 2025 年下半年推出 12 英寸产品，显示出明确的量产路线图。这表明产业上游正致力于制备更大尺寸、更高质量的光学级衬底，为降本奠定基础。

图表 31：SiC 晶圆示意图



资料来源：PAM-XIAMEN，五矿证券研究所整理

2024 年 Meta 发布的碳化硅光波导概念产品 “Orion”，其视场角达到 70°，是目前已披露的采用衍射光波导方案所达到的最大视场角。这款原型机成功验证了 SiC 材料在实现超大视场角方面的理论潜力。行业已通过 Meta Orion 等原型机完成了“从 0 到 1”的性能验证。当前阶段已进入“从 1 到 N”的产业化攻坚期，发展焦点集中于材料成本的降低与复杂加工工艺的成熟。国内供应链在衬底环节的积极进展为后续突破提供了基础。

四、微显示技术更新：5 种方案的性能取舍

光波导技术对微显示器件的亮度、出光效率、尺寸提出严苛要求——高亮度需微显示器件提升发光功率，却导致功耗与散热压力；小尺寸适配光波导轻薄化需求，却限制了芯片性能释放；低成本需求与高端方案的技术壁垒形成冲突。当前尚无单一微显示方案能完美匹配光波导的技术需求，成为制约 AR 眼镜显示体验升级与规模化普及的重要瓶颈。

AR 采用的微显示技术主要有 LCoS、DLP、LBS、OLEDs、Micro LED。

LCoS（硅基液晶）：技术成熟度高、成本较低，在中低端 AR 眼镜中应用广泛，但其响应速度较慢（易出现拖影），且需搭配偏振光组件，导致光学系统体积偏大，与光波导追求的“极致轻薄”存在适配矛盾；同时，其开口率受限，亮度提升空间不足，难以满足强光环境下的清晰显示需求。

DLP（数字光处理）：DLP 技术依托 DMD 数字微镜器件实现高速光开关，具备亮度高、光效强、色彩还原度佳的核心优势，技术成熟度高且量产供应链完善，在早期 AR 眼镜及车载 HUD 等场景中实现了规模化应用。但该方案的核心短板与光波导的轻量化、极致轻薄需求存在明显适配矛盾：一方面，DLP 光机系统结构复杂、整机体积偏大，难以匹配光波导对光学

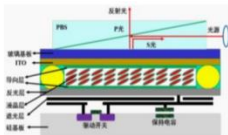
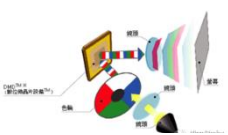
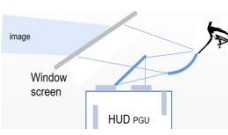
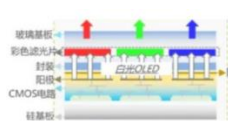
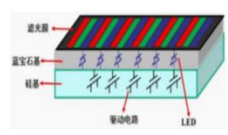
模组小型化的要求，制约了 AR 眼镜的轻薄化设计；另一方面，方案易出现“彩虹效应”等显示瑕疵，且光机功耗与散热压力较高，同时成本控制空间有限，在当前中高端 AR 眼镜向消费级普及的趋势下，逐步被更适配光波导的 OLEDoS 等方案替代，仅在特定工业、车载等非消费级场景保留应用空间。

LBS（激光束扫描）：LBS 技术通过外部激光光源逐点扫描成像，核心优势在于结构极度紧凑、光机体积极小（仅 0.5-1cc）、功耗表现优异，且成像始终处于对焦状态，理论上与光波导的轻量化、高透光率特性高度契合，在 AR-HUD、轻量化 AR 显示等场景具备探索价值。但该方案的产业化瓶颈显著制约了其在消费级 AR 眼镜的大规模落地：其一，激光成像存在固有散斑问题，易导致画面噪点、显示均匀性不足，影响视觉体验；其二，方案分辨率上限相对有限，难以满足当前 AR 眼镜对高清晰度、大视场角的需求；其三，激光光源的可靠性、人眼安全防护及成本控制仍存挑战，制造流程虽标准化但在消费级产品中的适配性待优化，目前仅在微软 HoloLens 2 等少数工业级、专业级 AR 产品中实现应用，尚未进入消费级主流赛道。

OLEDoS：具备高分辨率、高对比度、响应速度快等优势，与光波导的高透光率特性契合度较高，是当前中高端 AR 眼镜的主流选择。但核心痛点在于功耗较高，小尺寸芯片的散热压力大，且量产良率受限导致成本居高不下，制约了终端产品的价格下探；此外，其发光寿命相对较短，长期高频使用下的稳定性有待验证。

Micro LED：作为理想的下一代微显示技术，具备高亮度、高刷新率、低功耗、长寿命等全方位优势，与碳化硅光波导搭配可实现“超大视场角+高画质”的极致体验（如 Meta Project Orion 原型机探索应用）。但目前技术尚处产业化初期，面临芯片转移良率低、红光芯片效率不足、成本极高（单模组价格是 Micro OLED 的 3-5 倍）等问题，短期内难以大规模商用。

图表 32：微显示技术对比

对比维度	LCoS	DLP	LBS	OLEDoS	Micro-LED
结构示意图					
显示原理	反射式液晶显示	数字微镜阵列	外部激光光源	有机自发光	无机自发光
响应时间	毫秒(ms)级	微秒(μs)级	纳秒(ns)级	微秒(μs)级	纳秒(ns)级
分辨率范围	720p-4K (3000-5000PPI)	480p-4K	720p-1080p	4K (3000-4000PPI)	540p-2K (实验室 4K)
对比度	1000:1	2500:1	2000:1	100000:1	1000000:1
亮度	由背光源决定，普遍 > 10000nit	由背光源决定，普遍 > 20000nit	100000nit	1000-6000nit	全彩 100000nit，单色 1000000nit
器件结构	复杂	复杂	复杂	简单	简单
工作温度	10° -70°（第二表 0° -50°）	-40° -90°	较宽	-50° -70°	-100° -120°
功耗	高	中	中	低	低

光机体积	5-6cc	4cc	0.5-1cc	0.5-1cc	<0.5cc
寿命	10 万小时	10 万小时	10 万小时	<1 万小时	>10 万小时
核心优势	模组体积小、成本低、解析度高、色域广、高分辨率、技术成熟、性价比高	制造技术成熟、规模量产、成本中等	制造流程标准化、中高端产品有成本优势、亮度高	响应速度快、功耗低、体积小、高对比度、延展性好	响应速度最快、功耗极低、体积最小、亮度极高、寿命长、环境适应性强
核心劣势	响应速度慢、功耗高、对比度低	结构复杂、光机体积偏大	激光散斑问题、量产适配性待优化	亮度偏低、成本高、寿命短、工艺复杂、良率不足	灵活性差、制造成本极高、量产难度大、工艺未标准化
技术成熟度	制造技术较为成熟	制造技术成熟	制造技术成熟	干湿法工艺交错、制程复杂	制造工艺复杂、尚未实现标准化
产业化进展	规模量产，成本低廉，高性价比	规模量产，成本中等	制造流程高度标准化，中高端产品有成本优势	成本高，小规模量产，未到达高良率	成本高，小规模量产，全彩显示尚处研究阶段
主要应用场景	高端投影、AR 眼镜 (MagicLeap2、Googleglass)、车载 HUD	中高端投影、激光电视、工业光刻	AR (微软 HoloLens2)、车载 HUD (尚未量产)	高端 AR/VR (AppleVisionPro)、军用头盔	AR/VR (超高亮度、超大屏显示)、可穿戴设备、车载透明显示

资料来源：MES 元宇宙，锡创投，光显世界洞察，MicroDisplay，艾邦 VR 产业咨询，艾瑞咨询，TrendForce，梁宇华等《硅基液晶（LCoS）微显示技术》，张洋《Micro-LED：下一代 VR/AR 技术候选者》，五矿证券研究所

总体来讲，硅基 Micro LED 则因其在亮度、功耗及体积方面的卓越综合性能，正成为实现“全天候、可日常佩戴”AR 眼镜的关键路径。其技术优势符合当前消费电子级 AR 眼镜向户外移动场景拓展的核心痛点：数百万尼特的超高原生亮度，结合光波导方案的高透过率特性，能够确保数字信息在强烈环境光下依然清晰可视。同时，其器件结构紧凑，能将显示模组体积压缩至极小，助力整机重量进入 30-40 克区间，逼近传统眼镜形态。

风险提示

- 1、若 AR 光学、光波导、SiC 材料及微显示技术进展不及预期，可能导致行业产业化落地节奏放缓。
- 2、核心工艺良率提升缓慢、关键材料成本居高不下，或将制约 AR 眼镜规模化普及进程。

分析师声明

作者在中国证券业协会登记为证券投资咨询(分析师)，以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告。作者保证：(i) 本报告所采用的数据均来自合规渠道；(ii) 本报告分析逻辑基于作者的职业理解，并清晰准确地反映了作者的研究观点；(iii) 本报告结论不受任何第三方的授意或影响；(iv) 不存在任何利益冲突；(v) 英文版翻译若与中文版有所歧义，以中文版报告为准；特此声明。

投资评级说明

投资建议的评级标准		评级	说明
报告中投资建议所涉及的评级分为股票评级和行业评级（另有说明的除外）。评级标准为报告发布日后 6 到 12 个月内的相对市场表现，也即以报告发布日后的 6 到 12 个月内的公司股价(或行业指数)相对同期相关证券市场代表性指数的涨跌幅作为基准。其中：A 股市场以沪深 300 指数为基准；香港市场以恒生指数为基准；美国市场以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为基准。	股票评级	买入	预期个股相对同期相关证券市场代表性指数的回报在 20%及以上；
		增持	预期个股相对同期相关证券市场代表性指数的回报介于 5%~20%之间；
		持有	预期个股相对同期相关证券市场代表性指数的回报介于-10%~5%之间；
		卖出	预期个股相对同期相关证券市场代表性指数的回报在-10%及以下；
		无评级	预期对于个股未来 6 个月市场表现与基准指数相比无明确观点。
	行业评级	看好	预期行业整体回报高于基准指数整体水平 10%以上；
		中性	预期行业整体回报介于基准指数整体水平-10%~10%之间；
		看淡	预期行业整体回报低于基准指数整体水平-10%以下。

一般声明

五矿证券有限公司（以下简称“本公司”）具有中国证监会批复的证券投资咨询业务资格。本公司不会因接收人收到本报告即视其为客户，本报告仅在相关法律许可的情况下发放，并仅为提供信息而发放，概不构成任何广告。本报告的版权仅为本公司所有，未经本公司书面许可，任何机构和个人不得以任何形式对本研究报告的任何部分以任何方式制作任何形式的翻版、复制或再次分发给任何其他人。如引用须联络五矿证券研究所获得许可后，再注明出处为五矿证券研究所，且不得对本报告进行有悖原意的删节和修改。在刊载或者转发本证券研究报告或者摘要的同时，也应注明本报告的发布人和发布日期及提示使用证券研究报告的风险。若未经授权刊载或者转发本报告的，本公司将保留向其追究法律责任的权利。若本公司以外的其他机构（以下简称“该机构”）发送本报告，则由该机构独自为此发送行为负责。

本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入或将产生波动；在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告；本公司不保证本报告所含信息保持在最新状态。同时，本公司对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。

本报告的作者是基于独立、客观、公正和审慎的原则制作本研究报告。本报告的信息均来源于公开资料，本公司对这些信息的准确性和完整性不作任何保证，也不保证所包含信息和建议不发生任何变更。本公司已力求报告内容的客观、公正，但文中的观点、结论和建议仅供参考，不包含作者对证券价格涨跌或市场走势的确定性判断。在任何情况下，报告中的信息或意见不构成对任何人的投资建议，投资者据此做出的任何投资决策与本公司和作者无关。在任何情况下，本公司、本公司员工或者关联机构不承诺投资者一定获利，不与投资者分享投资收益，也不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。本公司及作者在自身所知情范围内，与本报告中所评价或推荐的证券不存在法律法规要求披露或采取限制、静默措施的利益冲突。

五矿证券版权所有。保留一切权利。

特别声明

在法律许可的情况下，五矿证券可能会持有本报告中提及公司所发行的证券并进行交易，也可能为这些公司提供或争取提供投资银行、财务顾问和金融产品等各种金融服务。因此，投资者应当考虑到五矿证券及/或其相关人员可能存在影响本报告观点客观性的潜在利益冲突，投资者请勿将本报告视为投资或其他决定的唯一参考依据。

联系我们

上海	深圳	北京
地址：上海市浦东新区陆家嘴街道富城路 99 号震旦国际大厦 30 楼 邮编：200120	地址：深圳市南山区滨海大道 3165 号五矿金融大厦 23 层 邮编：518035	地址：北京市东城区朝阳门北大街 3 号五矿广场 C 座 3F 邮编：100010

Analyst Certification

The research analyst is primarily responsible for the content of this report, in whole or in part. The analyst has the Securities Investment Advisory Certification granted by the Securities Association of China. Besides, the analyst independently and objectively issues this report holding a diligent attitude. We hereby declare that (1) all the data used herein is gathered from legitimate sources; (2) the research is based on analyst's professional understanding, and accurately reflects his/her views; (3) the analyst has not been placed under any undue influence or intervention from a third party in compiling this report; (4) there is no conflict of interest; (5) in case of ambiguity due to the translation of the report, the original version in Chinese shall prevail.

Investment Rating Definitions

The rating criteria of investment recommendations The ratings contained herein are classified into company ratings and sector ratings (unless otherwise stated). The rating criteria is the relative market performance between 6 and 12 months after the report's date of issue, i.e. based on the range of rise and fall of the company's stock price (or industry index) compared to the benchmark index. Specifically, the CSI 300 Index is the benchmark index of the A-share market. The Hang Seng Index is the benchmark index of the HK market. The NASDAQ Composite Index or the S&P 500 Index is the benchmark index of the U.S. market.		Ratings	Definitions
	Company Ratings	BUY	Stock return is expected to outperform the benchmark index by more than 20%;
		ACCUMULATE	Stock relative performance is expected to range between 5% and 20%;
		HOLD	Stock relative performance is expected to range between -10% and 5%;
		SELL	Stock return is expected to underperform the benchmark index by more than 10%;
		NOT RATED	No clear view of the stock relative performance over the next 6 months.
	Sector Ratings	POSITIVE	Overall sector return is expected to outperform the benchmark index by more than 10%;
		NEUTRAL	Overall sector expected relative performance ranges between -10% and 10%;
		CAUTIOUS	Overall sector return is expected to underperform the benchmark index by more than 10%.

General Disclaimer

Minmetals Securities Co., Ltd. (or "the company") is licensed to carry on securities investment advisory business by the China Securities Regulatory Commission. The Company will not deem any person as its client notwithstanding his/her receipt of this report. The report is issued only under permit of relevant laws and regulations, solely for the purpose of providing information. The report should not be used or considered as an offer or the solicitation of an offer to sell, buy or subscribe for securities or other financial instruments. The information presented in the report is under the copyright of the company. Without the written permission of the company, none of the institutions or individuals shall duplicate, copy, or redistribute any part of this report, in any form, to any other institutions or individuals. The party who quotes the report should contact the company directly to request permission, specify the source as Equity Research Department of Minmetals Securities, and should not make any change to the information in a manner contrary to the original intention. The party who re-publishes or forwards the research report or part of the report shall indicate the issuer, the date of issue, and the risk of using the report. Otherwise, the company will reserve its right to taking legal action. If any other institution (or "this institution") redistributes this report, this institution will be solely responsible for its redistribution. The information, opinions, and inferences herein only reflect the judgment of the company on the date of issue. Prices, values as well as the returns of securities or the underlying assets herein may fluctuate. At different periods, the company may issue reports with inconsistent information, opinions, and inferences, and does not guarantee the information contained herein is kept up to date. Meanwhile, the information contained herein is subject to change without any prior notice. Investors should pay attention to the updates or modifications. The analyst wrote the report based on principles of independence, objectivity, fairness, and prudence. Information contained herein was obtained from publicly available sources. However, the company makes no warranty of accuracy or completeness of information, and does not guarantee the information and recommendations contained do not change. The company strives to be objective and fair in the report's content. However, opinions, conclusions, and recommendations herein are only for reference, and do not contain any certain judgments about the changes in the stock price or the market. Under no circumstance shall the information contained or opinions expressed herein form investment recommendations to anyone. The company or analysts have no responsibility for any investment decision based on this report. Neither the company, nor its employees, or affiliates shall guarantee any certain return, share any profits with investors, and be liable to any investors for any losses caused by use of the content herein. The company and its analysts, to the extent of their awareness, have no conflict of interest which is required to be disclosed, or taken restrictive or silent measures by the laws with the stock evaluated or recommended in this report.

Minmetals Securities Co. Ltd. 2019. All rights reserved.

Special Disclaimer

Permitted by laws, Minmetals Securities Co., Ltd. may hold and trade the securities of companies mentioned herein, and may provide or seek to provide investment banking, financial consulting, financial products, and other financial services for these companies. Therefore, investors should be aware that Minmetals Securities Co., Ltd. or other related parties may have potential conflicts of interest which may affect the objectivity of the report. Investors should not make investment decisions solely based on this report.

Contact us

Shanghai

Address: 30/F, Zhendan International Building, No.99 Fucheng Road, Lujiazui Street, Pudong New District, Shanghai
Postcode: 200120

Shenzhen

Address: 23F, Minmetals Financial Center, 3165 Binhai Avenue, Nanshan District, Shenzhen
Postcode: 518035

Beijing

Address: 3/F, Tower C, Minmetals Plaza, No.3 Chaoyangmen North Street, Dongcheng District, Beijing
Postcode: 100010