**一文看懂主流AR眼镜的核心显示技术——光波导**

光波导方案从光学效果、外观形态，和量产前景来说，都具备最好的发展潜力，可能会是让AR眼镜走向消费级的不二之选。

近期，AR光学模组厂商DigiLens、耐德佳、灵犀微光等公司的融资消息的频繁披露，加之主流AR设备微软HoloLens2、Magic Leap One等对光波导技术的采用和设备量产，光波导的讨论热度也持续增加了不少。

光波导，因其轻薄和外界光线的高穿透特性而被认为是消费级AR眼镜的必选光学方案，又因其价格高和技术门槛高让人望而却步。

那么，光波导的工作原理是怎样的？市面上林林总总的阵列光波导、几何光波导、衍射光波导、全息光波导、多层光波导又有什么不同？它又是如何一步步改变AR眼镜市场格局的？

**一、光波导，一个应AR眼镜需求而生的光学方案**

增强现实(AR)与虚拟现实(VR)是近年来广受关注的科技领域，它们的近眼显示系统都是将显示器上的像素， 通过一系列光学成像元件形成远处的虚像并投射到人眼中。

不同之处在于，AR眼镜需要透视(see-through)，既要看到真实的外部世界，也要看到虚拟信息，所以成像系统不能挡在视线前方。这就需要多加一个或一组光学组合器(optical combiner)，通过“层叠”的形式， 将虚拟信息和真实场景融为一体，互相补充，互相“增强”。

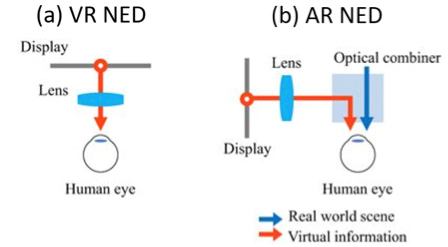


图 1. (a) 虚拟现实(VR)近眼显示系统的示意图; (b) 增强现实(AR)近眼显示系统的示意图。

NED：近眼显示(Near-eye display，简称NED)

AR设备的光学显示系统通常由微型显示屏和光学元件组成。概括来说，目前市场上的AR眼镜采用的显示系统就是各种微型显示屏和棱镜、自由曲面、BirdBath、光波导等光学元件的组合，其中光学组合器的不同，是区分AR显示系统的关键部分。

微型显示屏，用来为设备提供显示内容。它可以是自发光的有源器件，比如发光二极管面板像micro-OLED和现在很热门的micro-LED，也可以是需要外部光源照明的液晶显示屏(包括透射式的LCD和反射式的LCOS)，还有基于微机电系统(MEMS)技术的数字微镜阵列(DMD, 即DLP的核心)和激光束扫描仪(LBS)。

这里做了一张简单的AR光学显示系统的分类和产品举例：



因为本文主要阐述光波导的工作原理和特点，对其它光学方案不做详细介绍，关于几种方案的区别，之前也有较多文章进行了阐述。很显然，完美的光学方案还没有出现，才有目前市场上百家争鸣、百花齐放的状态，这需要AR眼镜的产品设计者依据应用场景、产品定位等来做权衡取舍。

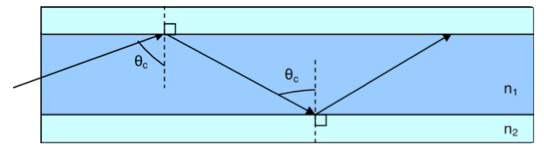
我们认为，光波导方案从光学效果、外观形态，和量产前景来说，都具备最好的发展潜力，可能会是让AR眼镜走向消费级的不二之选。

**二、光波导是如何工作的**

在上述光学成像元件中，光波导技术是应AR眼镜需求而生的一个比较有特色的光学组件，因它的轻薄与外界光线的高穿透特性而被认为是消费级AR眼镜的必选光学方案，而随着微软Hololens两代产品以及Magic Leap One等设备对光波导的采用和量产，关于光波导的讨论热度也在持续增加。

其实，波导技术并不是什么新发明，我们熟悉的光通信系统中，用来传输信号的光纤组成了无数条连接大洋彼岸的海底光缆，就是波导的一种，只不过传输的是我们看不见的红外波段的光。

在AR眼镜中，要想光在传输的过程中无损失无泄漏，“全反射”是关键，即光在波导中像只游蛇一样通过来回反射前进而并不会透射出来。简单来说达到全反射需要满足两个条件：(1) 传输介质即波导材料需要具备比周围介质高的折射率(如图2所示n1> n2); (2) 光进入波导的入射角需要大于临界角θc.



光机完成成像过程后，波导将光耦合进自己的玻璃基底中，通过“全反射”原理将光传输到眼睛前方再释放出来。这个过程中波导只负责传输图像，一般情况下不对图像本身做任何“功”(比如放大缩小等)，可以理解为“平行光进，平行光出”，所以它是独立于成像系统而存在的一个单独元件。

光波导的这种特性，对于优化头戴的设计和美化外观有很大优势。因为有了波导这个传输渠道，可以将显示屏和成像系统远离眼镜移到额头顶部或者侧面，这极大降低了光学系统对外界视线的阻挡，并且使得重量分布更符合人体工程学，从而改善了设备的佩戴体验。

这里将波导技术的主要优点和不足罗列如下，希望读者阅读完本文后会对背后的缘由更加了解。

**优点**

* 增大动眼框范围从而适应更多人群，改善机械容差，推动消费级产品实现 – 通过一维和二维扩瞳技术增大动眼框。
* 成像系统旁置，不阻挡视线并且改善配重分布 –波导镜片像光缆一样将图像传输到人眼。
* 外观形态更像传统眼镜，利于设计迭代 –波导形态一般是平整轻薄的玻璃片，其轮廓可以切割。
* 提供了“真”三维图像的可能性 – 多层波导片可以堆叠在一起，每层提供一个虚像距离。

**不足**

* 光学效率相对较低 – 光在耦合进出波导以及传输的过程中都会有损失，并且大的动眼框使得单点输出亮度降低。
* 几何波导: 繁冗的制造工艺流程导致总体良率较低。
* 衍射波导: 衍射色散导致图像有“彩虹”现象和光晕，非传统几何光学，设计门槛较高。

**三、光波导的不同分类**

如文章第二部分所提，波导结构的基础是轻薄透明的玻璃基底(一般厚度在几毫米或亚毫米级别)，光通过在玻璃上下表面之间来回“全反射”前进。

如果我们基于全反射的条件做一个计算，会发现只有一部分角度的入射光能够在波导中传输，这便决定了AR眼镜最终的视场角(FOV)范围。

简而言之，越是大的视场角，就需要越高折射率的玻璃基底来实现。因此传统玻璃制造商比如康宁(Corning)和肖特(Schott)，近年来都在为近眼显示市场研制专门的高折射率并且轻薄的玻璃基底，还在努力不断增大晶元尺寸以降低波导生产的单位成本。

有了高折射率玻璃基底，区别波导类型就主要在于光进出波导的耦合结构了。光波导总体上可以分为几何光波导（Geometric Waveguide）和衍射光波导（Diffractive Waveguide）两种，几何光波导就是所谓的阵列光波导，其通过阵列反射镜堆叠实现图像的输出和动眼框的扩大，代表光学公司是以色列的Lumus，目前市场上还未出现大规模的量产眼镜产品。

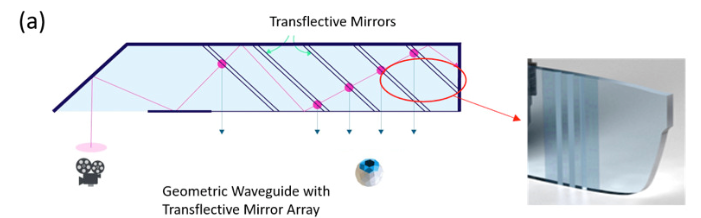
衍射光波导主要有利用光刻技术制造的表面浮雕光栅波导(Surface Relief Grating)和基于全息干涉技术制造的全息体光栅波导(Volumetric Holographic Grating)， HoloLens 2，Magic Leap One均属于前者。

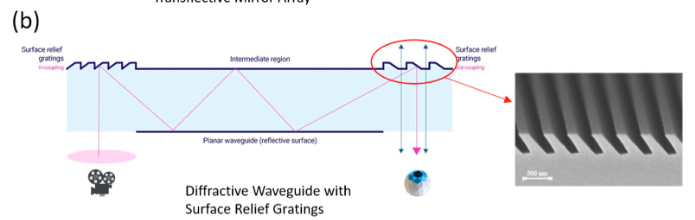
全息体光栅光波导则是使用全息体光栅元件代替浮雕光栅，苹果公司收购的Akonia公司采用的便是全息体光栅，另外致力于这个方向的还有Digilens。这个技术还在发展中，色彩表现比较好，但目前对FOV的限制也比较大。

这里还要区别一下真正的“全息技术”，其实这一直是个误区，全息光栅只是因为利用了类似于全息照相的原理来制造的，即用两束激光形成干涉条纹来调制光栅材料的特性以形成“折射率周期”，光栅本身并不能够全息成像。

**四、几何光波导的工作原理及优缺点**

限于文章篇幅的原因，今天主要分析几何波导的工作原理和优缺点。





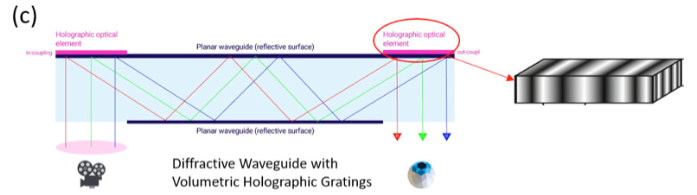


图 4. 光波导的种类: (a) 几何式光波导和“半透半反”镜面阵列的原理示意图, (b) 衍射式光波导和表面浮雕光栅的原理示意图， (c) 衍射式光波导和全息体光栅的原理示意图。

“几何光波导”的概念最先由以色列公司Lumus提出并一直致力于优化迭代，至今差不多快二十年了。按图4(a)所示，耦合光进入波导的一般是一个反射面或者棱镜。在多轮全反射后光到达眼镜前方时，会遇到一个“半透半反”镜面阵列，这就是耦合光出波导的结构了，也就是几何光波导里的“光组合器”。

“半透半反”(确切说是“部分透部分反”)的镜面是嵌入到玻璃基底里面并且与传输光线形成一个特定角度的表面，每一个镜面会将部分光线反射出波导进入人眼，剩下的光线透射过去继续在波导中前进。然后这部分前进的光又遇到另一个“半透半反”镜面，从而重复上面的“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。

在传统光学成像系统中，图像通常只有一个“出口”，叫做出瞳。这里的“半透半反”镜面阵列相当于将出瞳沿水平方向复制了多份，每一个出瞳都输出相同的图像，这样眼睛在横向移动时都能看到图像，这就是一维扩瞳技术(1D EPE)。

详细说明，假设进入波导“入瞳”的是直径4毫米的光束，由于波导只负责传输而并不把图像放大缩小等，那么“出瞳”的也是4毫米的光束，在这种情况下人眼的瞳孔中心只能在这4毫米的范围内移动并且仍能看到图像。

这样的问题是，不同性别和年龄的人双眼瞳孔间距可能从51毫米到77毫米不等，如果近眼显示系统的光学中心依据瞳距的平均值(63.5毫米)位置来设计，这就意味着有很大一部分人戴上这个眼镜看不到清晰的图像或完全接收不到图像。

有了这个扩瞳技术，动眼框范围通常能从最初的4毫米左右扩大到10毫米以上。你可能会产生疑问，多个出瞳，这样眼睛不会看到重影么？放心吧，出瞳面只是图像的“傅里叶面”，人眼瞳孔会从这个面截取完整的图像信息并用自带的“透镜”晶状体会将出瞳面透射到真正的“像面”（视网膜）上，因而同一角度的光还是会汇聚到同一个像素（视觉细胞），不会出现重影。

可能有点难理解，但这是扩瞳技术可行的精髓。动眼框的扩大解决了产品设计中的很多问题，例如机械设计容差、产品规格数目(需不需要分男版和女版)、用户交互体验等，将AR眼镜向消费级产品的实现大大推动了一步。

但是天下没有免费的晚餐，复制出瞳导致总的出光面积增大，自然而然在每一个出瞳的位置看到的通光量就减小了，这也是引起波导技术光效率比传统光学系统偏低的原因之一。

几何光波导运用传统几何光学设计理念、仿真软件和制造流程，没有牵扯到任何微纳米级结构。因此图像质量包括颜色和对比度可以达到很高的水准。

但是，工艺流程比较繁冗，其中一步是“半透半反”镜面阵列的镀膜工艺。由于光在传播过程中会越来越少，那么阵列中这五六个镜面的每一个都需要不同的反射透射比(R/T)，以保证整个动眼框范围内的出光量是均匀的。

并且由于几何波导传播的光通常是偏振的(来源于LCOS微型显示屏的工作原理)，导致每个镜面的镀膜层数可能达到十几甚至几十层。另外，这些镜面是镀膜后层层摞在一起并用特殊的胶水粘合，然后按照一个角度切割出波导的形状，这个过程中镜面之间的平行度和切割的角度都会影响到成像质量。

因此，即使每一步工艺都可以达到高良率，这几十步结合起来的总良率却是一个挑战。每一步工艺的失败都可能导致成像出现瑕疵，常见的有背景黑色条纹、出光亮度不均匀、鬼影等。

另外，虽然随着工艺的优化镜面阵列已经几乎做到“不可见”，但在关掉光机的情况下仍然可以看到镜片上的一排竖条纹(即镜面阵列)，可能会遮挡一部分外部视线，也影响了AR眼镜的美观。

内容来源：https://36kr.com/p/5210076