

Wellseenn XR

XR显示屏幕系列研究报告

开篇：通往沉浸之路

XR Display analysis report
Series 1



何万城 Wellsenn XR 首席分析师
电话/微信: 18611823719
Email: hewancheng@wellsenn.com



维深信息 wellsenn XR 助手
交流群/微信: 17302629715
添加请备注: XR内容交流

wellsenn XR

免责声明:

本报告所采取的数据均来自于合规渠道，研究方法和分析逻辑基于维深信息的专业理解，准确的反应了作者的研究观点。本报告仅在相关法律许可的情况下发布和流转，在任何情况下，本报告中的信息或者表述的观点均不构成对任何人和任何机构的投资建议。本报告的信息来源于公开的资料和数据库，维深信息对该信息的准确性、完整性或者可靠性做尽可能的追求但不做任何保证。本报告所陈列的数据和资料、观点意见和推测预测仅反应报告发布时点维深信息的判断，在不同时期，维深信息可发出与本报告所载的资料、意见及推测不一致的报告。维深信息不保证本报告所含的信息在最新的状态，同时，维深信息对本报告所含信息可在不发出通知的情况下做出修改，读者可自行关注和跟踪维深信息最新更新和修改。

版权声明:

本报告版权归属为维深信息，欢迎研究和引用本报告内容，引用请注明数据来源为“维深信息wellsenn XR”，对未注明来源的引用、盗用、篡改或其他侵犯维深信息著作权的行为，维深信息将保留追求法律责任的权利。



XR 老何

我加入了这个星球，邀你一起学习



XR 前哨

星主：XR 老何

3

成员数量

5

内容数量

367

运营天数

不定期分享和回答 XR 产业链一手消息，苹果/Meta/华为等大厂内幕、供应链需求、投资机会、技术细节、路边社八卦等。

现价：¥399

微信扫码加入星球



目 录

一、XR显示屏幕概述 -----6

 (一) XR屏幕显示成像原理-----6

 (二) XR屏幕地位与价值 -----6

 (三) XR屏幕种类与类别 -----7

二、XR屏幕应用发展历程 -----8

 (一) 显示屏幕发展规律与历程 -----9

 (二) VR屏幕应用发展历程-----10

 (三) AR屏幕应用发展历程-----11

三、XR屏幕参数指标解析 -----13

 (一) 屏幕尺寸 -----13

 (二) 分辨率-----14

 (三) 像素密度PPI-----15

 (四) 像素尺寸 -----17

 (五) 角分辨率PPD -----18

 (六) 亮度-----21

 (七) 对比-----21

 (八) 刷新率-----23

 (九) 响应时间-----25

 (十) 色深/灰阶-----25

 (十一) 色域-----27

四、XR屏幕市场规模 -----29

 (一) 全球XR屏幕市场规模-----29

 (二) VR/AR屏幕分类市场规模 -----30

 (三) 不同类型型屏幕XR市场规模 -----30

前言

消费端显示屏幕的发展经历了电视、电脑、手机三大主要阶段，目前正在经历由手机向XR迭代的新阶段。显示屏幕作为XR设备的核心零部件，是XR沉浸体验的基础，决定了XR沉浸水平的体验层级，也是制约当前XR发展的关键零部件。

屏幕在XR硬件成本的占比高、价值量大，随着XR行业逐步发展和成熟，XR显示屏幕拥有巨大的市场规模和商业潜力，根据wellsenn XR的调研统计和预测，预计2025年全球XR显示屏幕市场规模为14亿美元，2030年全球XR显示屏幕规模超200亿美元，到2035年全球XR显示屏幕市场规模达830亿美元。

本报告为开篇报告，围绕XR屏幕的应用发展历程、核心指标参数、市场空间规模等进行详细分析和解读。

本系列报告后续将分别对Fast-LCD、硅基OLED、Micro LED等几个核心屏幕类型从基础原理、技术路径与趋势、生产工艺和流程、核心厂商等角度进行专题分析。

一、XR屏幕显示概述

(一) XR屏幕显示成像原理

XR按光学显示模组来区别分为VR和AR两种形态，其中VR主要为同轴光学，即屏幕、光学以及眼球同处于一条轴线上，AR则为旁轴光学，即屏幕、光学以及眼球处于不同的轴线上。因此VR和AR两种产品的屏幕有不同的形态和性能要求。（目前苹果Vision Pro与Quest 3类型的MR产品，其显示成像原理和VR一致，后文统一归类到VR产品中分析）

XR屏幕显示成像原理



图1 图片来源: wellsenn XR

在视觉体验上，VR注重视觉的沉浸感，屏幕显示上更追求大视场角以及高分辨率，AR注重与现实世界的交互，在显示上更追求小体积高亮度。

在硬件条件上，消费级VR一般为头显形态，重量介于300-700克之间，体积较大，屏幕尺寸可以做得更大，一般单目屏幕尺寸在1寸-3.5寸之间，消费级AR一般为眼镜形态，重量要求在80克以内，一般单目屏幕的尺寸要求在1寸以下甚至更低，例如搭配BirdBath或者自由曲面光学的AR眼镜屏幕普遍在0.49-0.7寸之间，搭配光波导光学方案的AR眼镜屏幕尺寸在0.1-0.23寸之间，同时，AR屏幕还要做成光引擎与AR光学搭配使用。

(二) XR屏幕地位与价值

XR设备最基本、最核心的特征是沉浸式体验，体验层级的提升包含了包括显示、内容、交互等等技术之和，屏幕分辨率是XR沉浸体验的基础，决定了XR沉浸水平的体验层级。以VR为例，要达到完全沉浸的体验层级，需要单目屏幕分辨率达到8K的水平，目前，VR显示正在从单目2K向单目4K升级，离单目8K还有一定的距离。

VR沉浸体验层级

技术体系	技术指标	体验层级			
		初级沉浸	部分沉浸	深度沉浸	完全沉浸
近眼显示	单目屏幕分辨率门槛	接近1K	1.5-2K	3K-4K	≥8K
	视场角（FOV）	90-100度	100-120度	140度左右	200度
	角分辨率（PPD）	≤15	15-20	30左右	60左右(人眼极限)
	可变焦显示	否	否	是	是
内容制作	360全景视频分辨率-弱交互	4K	8K	12K	24K
	游戏等内容分辨率-强交互	2K	4K	8K	16K
	虚拟化身	/	/	虚拟化身	精细化虚拟化身
渲染处理	渲染计算	2K/60FPS	4K/90FPS	8K/120FPS	16K/240FPS
	渲染优化	/	/	注视点渲染	
感知交互	追踪定位	Outside-in	Inside-out		
	眼动交互	/	/	眼球追踪	
	声音交互	/	沉浸声	个性化沉浸声	
	触觉交互	/	触觉反馈		精细化触觉反馈
	移动交互	/	虚拟移动（行走、定向等）		高性能虚拟移动

表1

数据来源：中国信通院

屏幕是XR硬件成本的占比较高、价值量比较大的核心零部件。例如目前VR采用Fast-LCD屏幕的成本的占比基本在15%-20%水平，而采用硅基OLED屏幕的VR或AR成本占在40%上下，采用MicroLED屏幕的AR成本占比也在40%左右。

XR屏幕整机成本占比



表2

数据来源：wellsenn XR

(三) XR屏幕种类与类别

XR屏幕按照发光性质来看，分为主动式发光和被动发光屏幕，其中主动式发光屏幕包括Micro OLED、Micro LED，被动发光屏包括LCD、LCOS、DLP、LBS等。主动发光型屏幕是指利用电能使器件发光，显示文字和图像的屏幕，被动发光型显示屏幕，是指器件本身不发光，需要借助于背光源的光，用电路控制外来光的反射率和透射率才能实现显示。

XR屏幕按发光类型分类

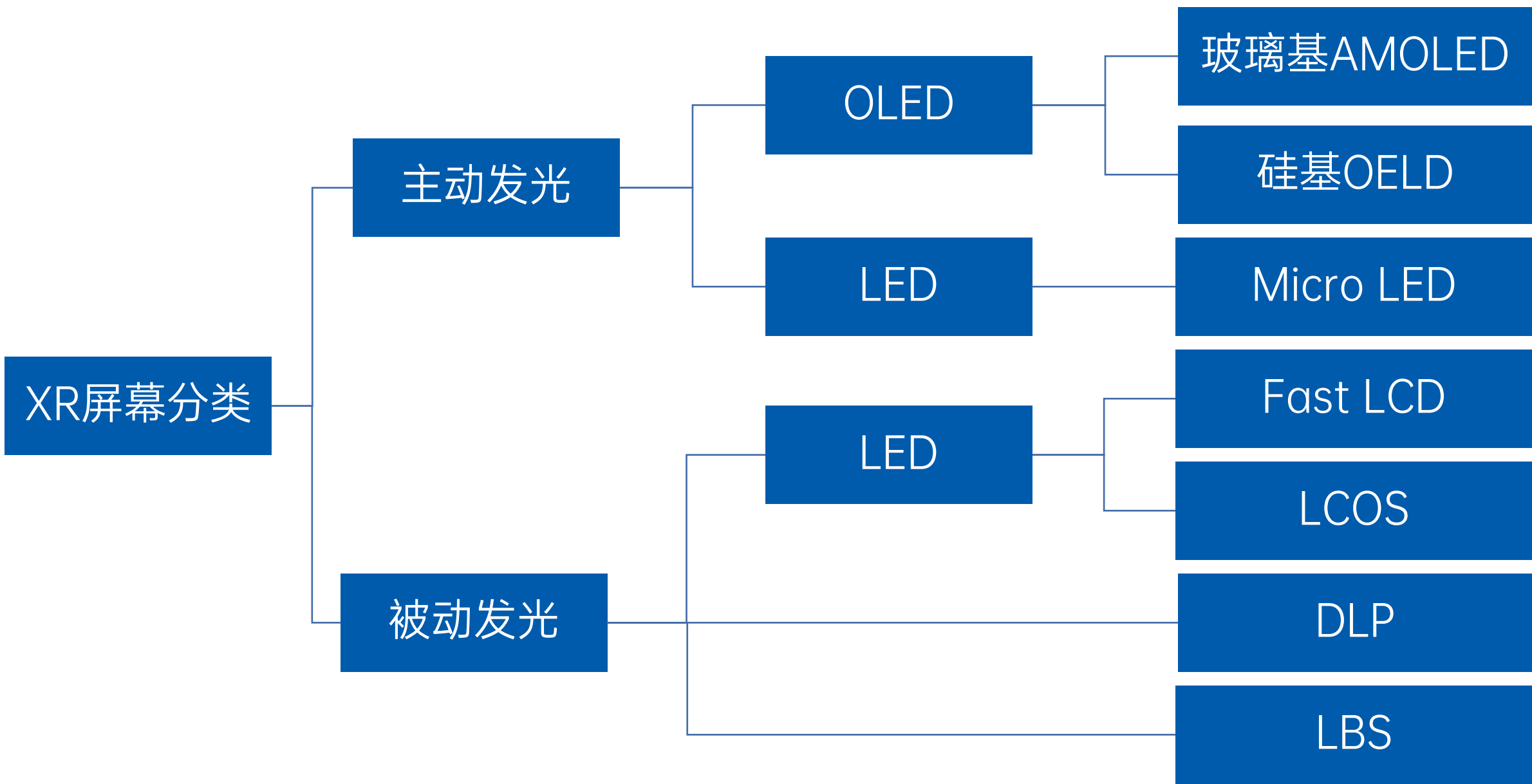


图2 图片来源: wellsenn XR

VR/AR根据各自的产品形态和需求，VR屏幕目前基本上是玻璃基AMOLED，硅基OLED和Fast-LCD三种类型屏幕，AR由于光学形态较多，使用的屏幕类型较为丰富，包括LCD、LCOS、DLP、LBS这四种被动式发光显示屏，以及硅基OLED，Micro LED两种主动式发光屏幕。

VR/AR屏幕常用屏幕分类

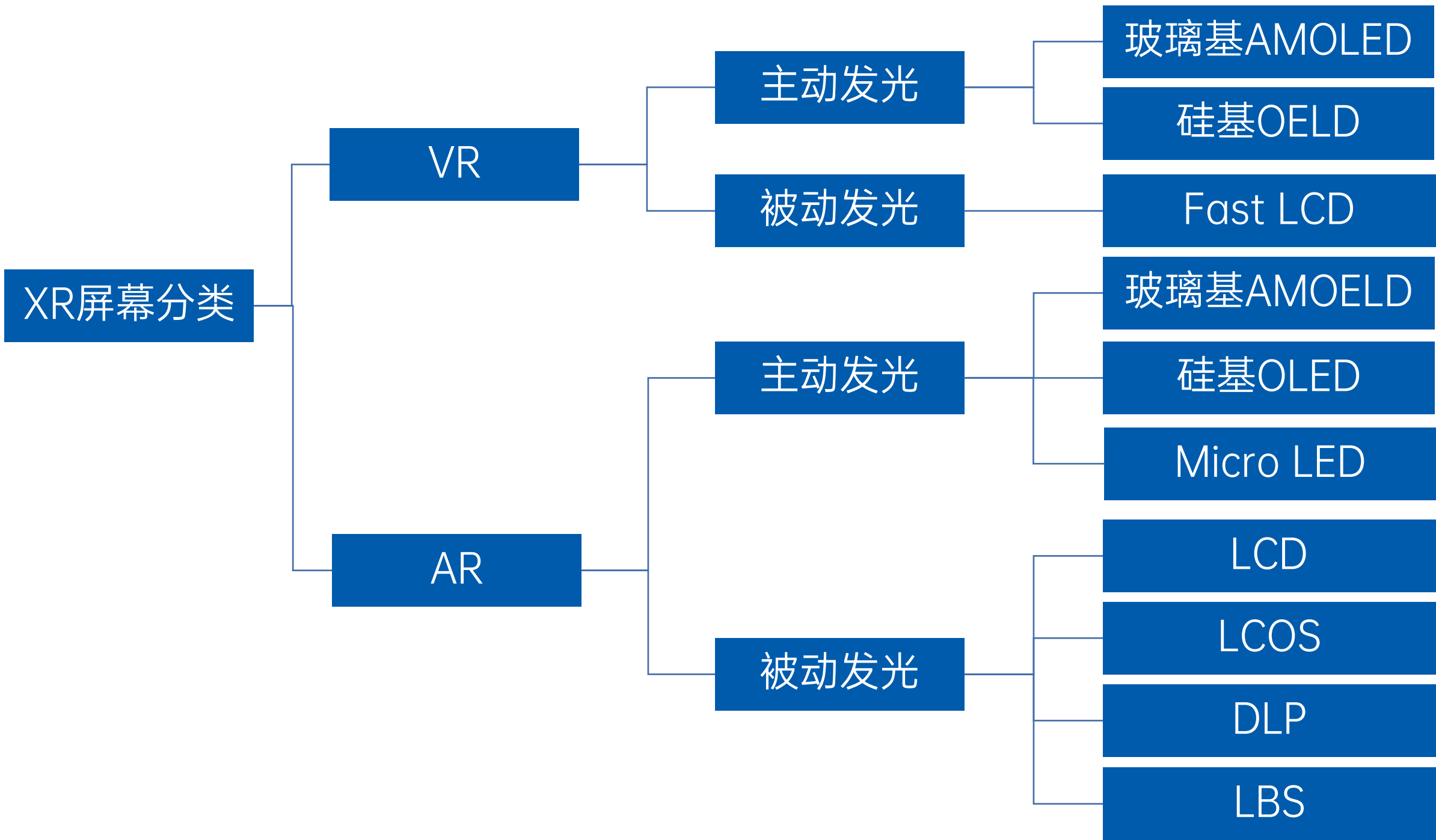


图3 wellsenn XR专题报告：XR显示屏幕系列研究报告 图片来源: wellsenn XR

二、XR屏幕应用发展历程

(一) 显示屏幕发展规律与历程

消费端显示屏幕的发展经历了电视、电脑、手机三大主要阶段，目前正在经历由手机向XR迭代的新阶段。

为了满足移动性和随时随地显示的需求，显示屏幕发展的核心规律是越来越靠近人眼，屏幕越来越小，对屏幕显示精细程度提出了更高的要求。电视一般离人眼距离为3米左右，尺寸为30-100寸之间，PPI在50-150就能满足视觉需求；电脑离人眼距离在0.5米左右，屏幕尺寸在10-30寸之间，PPI达到100-200水平基本满足视觉需求；手机离人眼更近一步到0.3米左右，屏幕则进一步缩小到3-8寸之间，需要PPI达到300以上的水平才能满足视网膜分辨率需求，而XR设备与人眼距离进一步压缩到0.05米以内，更小的尺寸，对PPI要求更高，700只是初级水平，达到视网膜分辨率级别至少需要PPI达到6000-10000的水平甚至更高。

显示屏幕的发展规律是在追求更高的分辨率和亮度的同时要实现屏幕越来越小型化，对屏幕的像素密度、亮度、功耗都提出了更高的要求，其核心是围绕更高像素密度ppi进行的，并在此基础上实现更高分辨率、高亮度以及低功耗等等。

显示屏幕发展演进规律

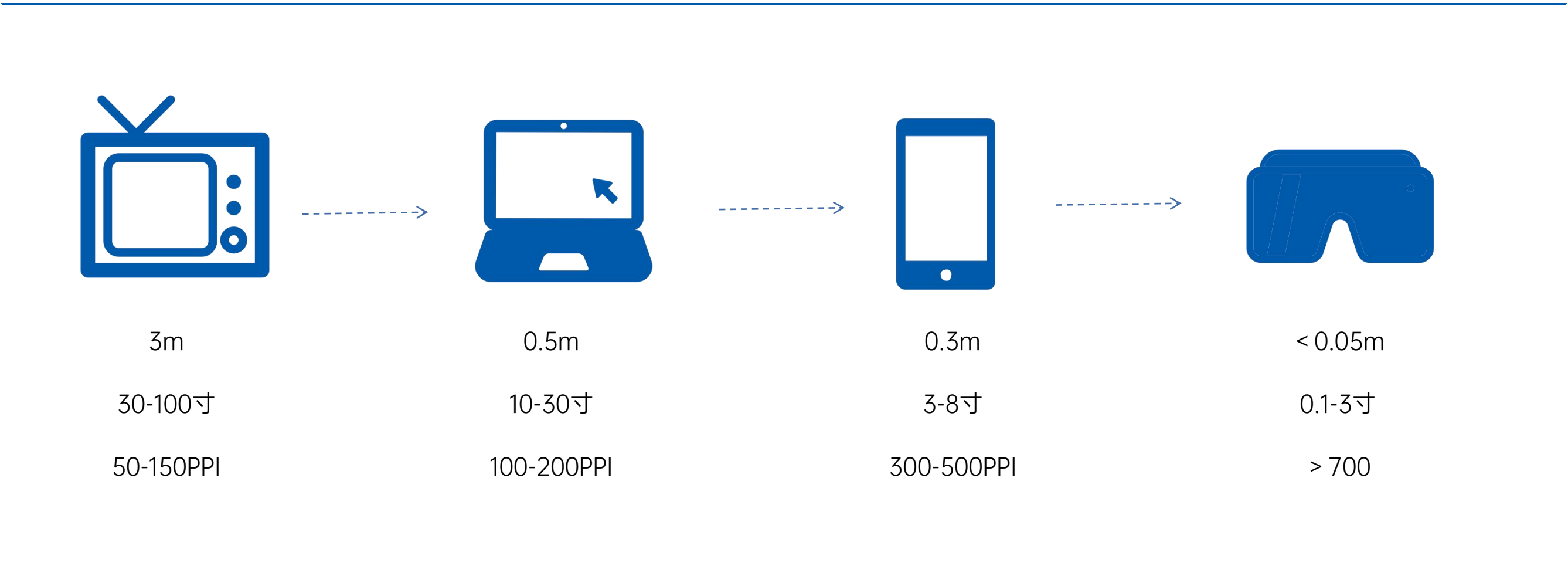


图4 图片来源: wellsenn XR

XR屏幕的发展沿着高PPI、高分辨率、高亮度、高刷新率、低功耗等方向发展，由于VR和AR所搭配的光学以及应用场景不一样，因此两者所使用的屏幕发展历程也有差异。

(二) VR屏幕应用发展历程

VR使用的屏幕发展至今经历了OLED、Fast-LCD、硅基OLED三个阶段：2015-2020年阶段，VR屏幕基本上以智能手机屏幕为基础的玻璃基或软基OLED屏为主，PPI在300-700范围，单目分辨率在1k-1.6k水平，刷新率为70Hz-100Hz之间，整体分辨率较低，双目分辨率一般都小于3K，代表性的产品有Oculus rift、HTC Vive、PS VR、Quest 1等。

2020-2025阶段，VR屏幕逐步采用分辨率更高、响应速度更快的Fast-LCD屏幕，PPI在700-1500范围，单目分辨率在1.6K-2.5K水平，刷新率为70Hz-120H之间，VR双目分辨率基本进入4K-5K水平，代表性的产品有Quest 2、Pico 4、Quest Pro、Quest 3、创维pancake1、奇遇3等。

VR下一阶段屏幕的发展持续往更高PPI、高分辨率迭代进步，2021年，中国VR品牌 arpara首次使用了视涯1.03寸硅基OLED屏幕，PPI达到3514、单目分辨率为2.5K，刷新率120Hz；2023年，Bigscreen发售了旗下首款搭载硅基 OLED 屏VR头显Beyond，屏幕供应厂商也是来自视涯1.03寸硅基OLED；2023年苹果发布的首代MR头显Apple Vision Pro采用更高规格的硅基OLED屏幕，PPI大于4000，单目分辨率接近4K水平，目前，索尼、京东方、视涯等国内外厂商逐步推出适合VR规格的硅基OLED屏幕，其尺寸都在1.3-1.4寸之间，分辨率接近4K水平，预计2024年以后将会有更多VR采用硅基OLED屏幕，并将双目的分辨率提高至8K的水平。随着XR芯片算力不断提升，VR屏幕也朝着更高分辨率进步，预计硅基OLED是VR实现轻量化双目8K、12k、16K水平的必经选择。

VR屏幕发展历程



图5 图片来源: wellsenn XR

(三) AR屏幕应用发展历程

AR屏幕发展与AR光学发展相关，不同AR光学，对屏幕有不同的要求，AR发展至今仍然存在棱镜、自由曲面、BirdBath、光波导等光学方案，每一种光学方案的光路设计、光效、透过率以及体积差异很大，与之相匹配的显示屏幕之间差异也很大，因此AR头显所使用的屏幕呈现出多种屏幕共存的局面。总体来看，AR屏幕仍是朝着高PPI、高分辨率、高亮度、小体积、低功耗的方向发展。

AR光学方案发展历程



图8

图片来源：wellsenn XR

光波导具有轻薄、透过率高的优点，容易做成眼镜的形态，被认为是AR最具应用前景的光学方案。光波导也存在光效低的弱点，在0.1%-10%之间（衍射光波导为0.1%-0.3%，阵列光波导为5%-15%），全天候的AR眼镜要求入眼的峰值亮度要达到3000nit，因此对输入端的显示亮度要求高，以1%的光效来计算，要达到入眼3000nit亮度需要在30万nit的发光亮度才行。如果以0.1%的光效来计算，则应该达到300万nit的亮度。此外，由于要做成眼镜形态，对显示屏的面积和体积要求很高，通常要求体积不超过1cc（立方厘米），因此，对于显示屏幕的体积和像素密度也提出了很高的要求，通常要求ppi要达到4000以上。

AR光波导光学至今搭配的屏幕共有5种类型，包括Lcos、LBS、DLP、硅基OLED、以及Micro LED五种屏幕（光机）。

- 2015年微软Hololens 1代作为最早量产的光波导AR头显，其使用了Lcos光机；
- 2019年，微软发布的Hololens 2使用了LBS光机；
- 2020年，Rokid发布的工业级AR头显X-Craft使用了DLP光机；
- 2021年，影目发布的INMO Air AR眼镜使用了阵列波导搭配硅基OLED屏幕；
- 2021年，OPPO发布的OPPO Air glass首次使用了Micro LED单绿光机；
- 2023年，雷鸟发布的X2 AR眼镜首次使用了三色合一的全彩Micro LED 光机。

目前，以头显形态为主的光波导AR头显，光学模组的体积要求较小，功耗要求较低，多采用Lcos方案或DLP方案，这类AR头显主要以工业、军警等B端市场为主，以眼镜形态为主的光波导AR眼镜，则采用对功耗和光机体积要求更高的硅基OLED或者Micro LED方案，这类AR眼镜主要作为信息提示、观影等场景，主要以消费级市场为主。

随着Micro LED的在材料和制造工艺的不断进步，Micro LED逐渐由单色向全彩的方向迭代，现阶段实现了RGB三色单片合成全彩（JBD X-cube）；下一阶段量子点以及堆叠方案技术不断突破和成熟，预计单片全彩Micro LED会逐渐量产，成本不断下降，逐渐成为AR眼镜的首选屏幕方案。

光波导AR适配屏幕发展历程



图6

图片来源：wellsenn XR

三、XR屏幕参数指标解析

XR屏幕较为核心参数指标主要包括尺寸、分辨率、像素密度PPI、亮度、刷新率、对比度、色域以及接口等。当前，屏幕尺寸、分辨率、像素密度PPI、亮度、刷新率是屏幕最为关心的参数指标。

（一）屏幕尺寸

屏幕尺寸的计量单位是以英制的寸（in）为单位，按屏幕发光区域的对角线量。1in（英寸）=2.54cm（厘米）。

屏幕尺寸示意图

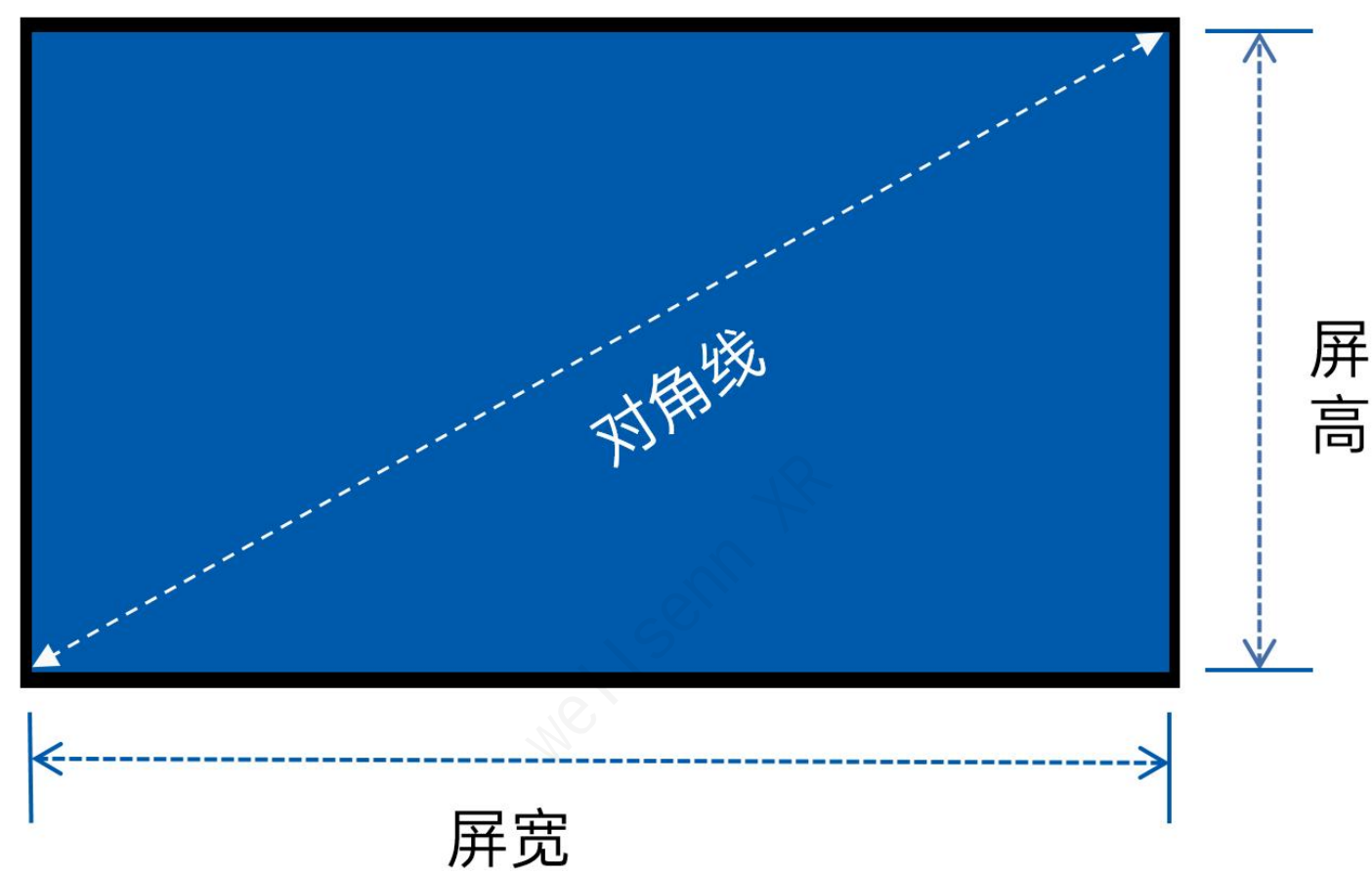


图7 图片来源：wellsenn XR

VR屏幕早期的与菲涅尔光学方案搭配，由一整块大屏生成左右两个图像，单块大屏的尺寸大概在5.5寸左右，例如quest 2的屏幕尺寸为5.46英寸；2022年开始逐步升级为pancake光学方案，一个pancake光学搭配1个屏幕，屏幕尺寸主要在1寸至3寸之间，例如pico 4的单个Fast LCD屏幕尺寸为2.56英寸，而arpara 5k 搭配的硅基OLED屏幕尺寸为1.03寸。整体来看，基于VR的光学技术与参数要求，VR的单目屏幕尺寸基本介于1-3.5寸之间。

AR屏幕受限于旁轴光学的眼镜形态，屏幕普遍较小，例如BB光学方案的雷鸟Air plus AR眼镜搭配的硅基OLED屏幕为0.68寸，影目Air光波导AR眼镜搭配的硅基OLED屏幕则为0.23寸，影目Go搭配的单绿Micro LED屏幕为0.13寸。整体而言，现阶段AR屏幕的尺寸要求在0.7寸一下。将来达到真正的眼镜形态，屏幕尺寸的控制0.2寸以下甚至更低，才能满足AR眼镜轻量化小型化的要求。

(二)分辨率

屏幕分辨率是指纵横向上的像素点数，单位是px，通常用横向的像素点×纵向的像素点表示，例如640×480、1920×1800等表示。相同尺寸的屏幕条件下，当屏幕分辨率低时（例如 640 x 480），在屏幕上显示的像素少，单个像素尺寸比较大；屏幕分辨率高时（例如 1600 x 1200），在屏幕上显示的像素多，单个像素尺寸比较小。

屏幕分辨率不是显示效果的一个绝对指标，只有屏幕尺寸相同下对比才有意义。例如 65寸3840×2160分辨率的电视，对比5寸2560×1440分辨率的电视，屏幕的制造工艺和难度、显示的效果完全不同。

屏幕分辨率通常取屏幕横向和纵向像素点较大一个值简称。例如一个主打横向观看的电视，横向1920*纵向1080的屏幕，通常称为2K屏，主打纵向观看的手机屏，横向1080*1920也称为2K屏幕。

屏幕分辨率有一些标准的规格称呼，例如HD屏幕分辨率全称High Definition或称720P，其分辨率为1280×720；FHD分辨率全称Full High Definition或称1080P，代表高清，分辨率为1920×1080。

常见屏幕分辨率规格示意图

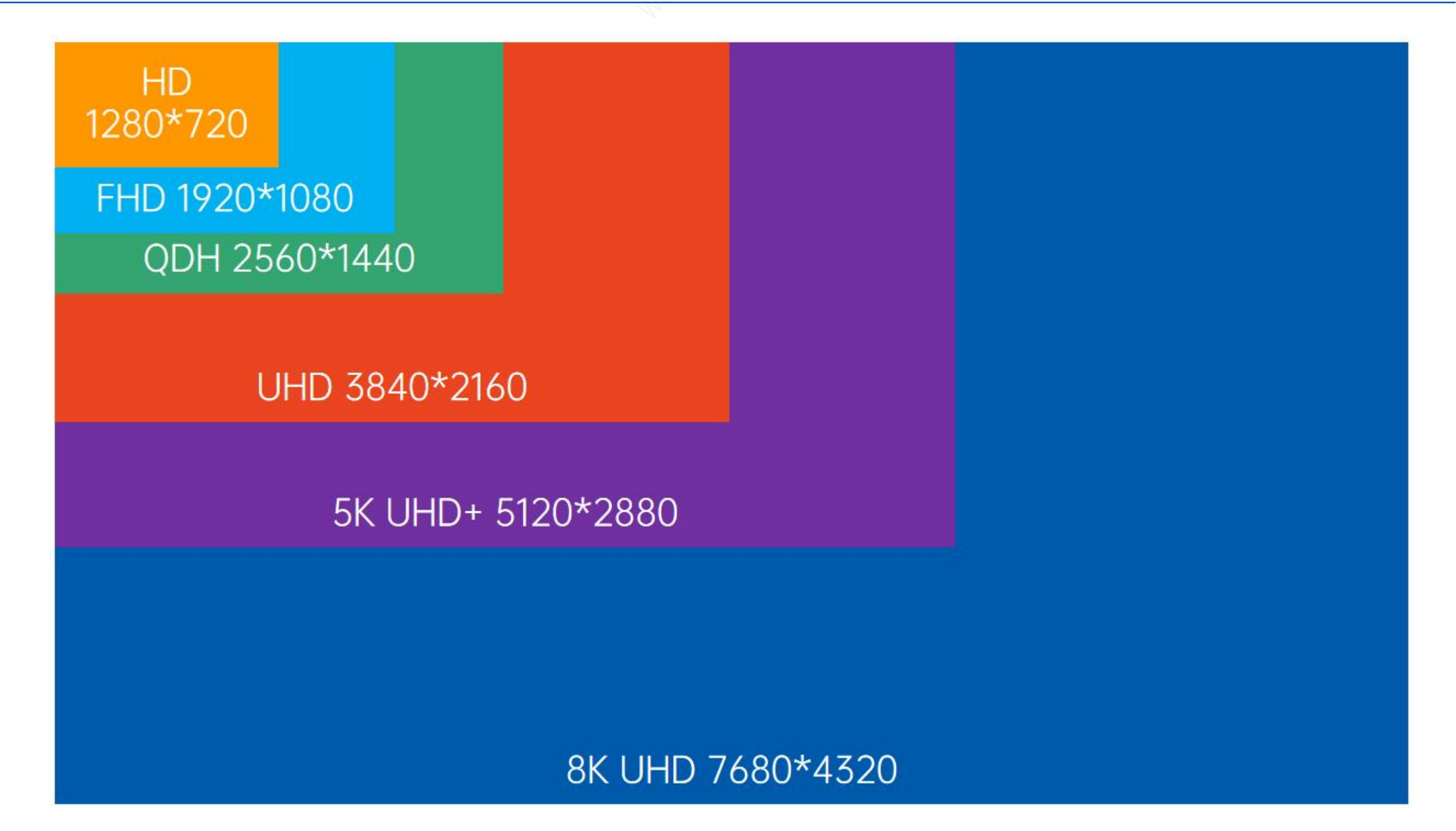
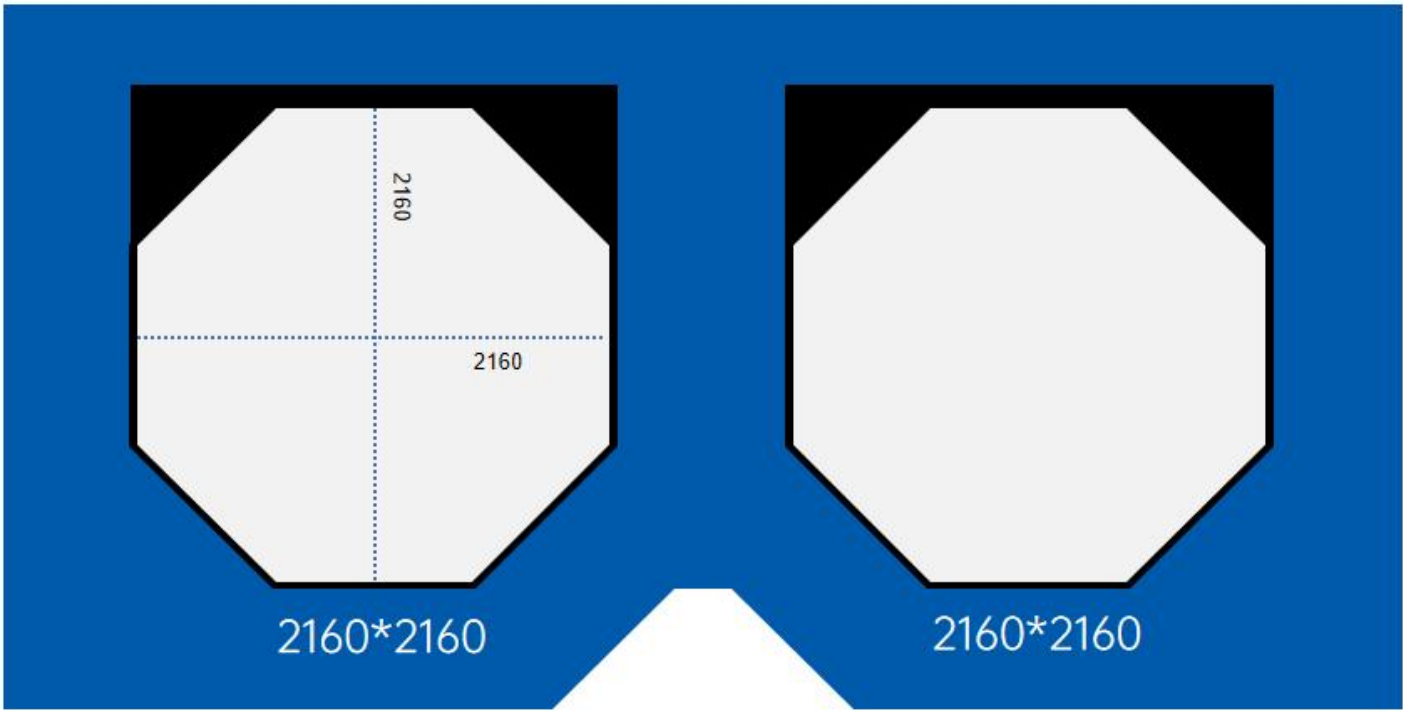


图8

图片来源：wellsenn XR

在XR中，VR分辨率一般指左右两个屏幕的分辨率之和，例如pico 4为4K分辨率，实际上单目的分辨率2160*2160，左右眼分辨率之和为4320*2160，因此称4K分辨率。

屏幕分辨率



VR双目4K(4320*2160)

图9图片来源: wellsenn XR

(三) 像素密度PPI

PPI是指像素密度单位，全称为Pixels Per Inch，表示的是每英寸对角线上所拥有的像素（pixel）数目，PPI数值越高，即代表显示屏能够以越高的密度显示图像。

像素密度PPI

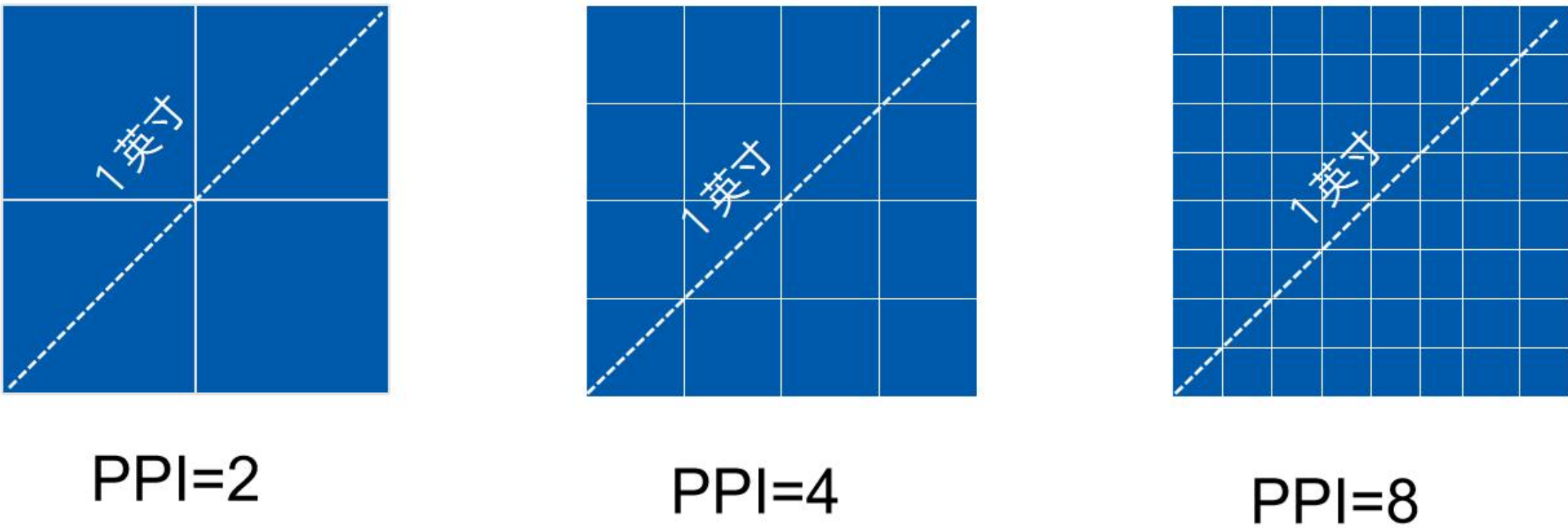


图10图片来源: wellsenn XR

在衡量屏幕大小的时候，习惯用对角线的英寸长度作为度量衡，因此PPI像素密度这一概念也需要以对角线为基准，知道了屏幕的大小，再知道屏幕的分辨率，根据勾股定理算出对角线上的像素量，就能得到像素密度PPI。

$$PPI = \frac{\sqrt{\text{横向像素}^2 + \text{纵向像素}^2}}{\text{屏幕尺寸}}$$

- 在屏幕尺寸不变的条件下，PPI越高，单位面积的像素数量就越多，分辨率就越高。
- 在分辨率不变的条件下，PPI越高，屏幕的尺寸就越小。
- 在PPI不变的情况下，屏幕尺寸越大，分辨率越大。

当前，玻璃基AMOLED可量产最高PPI可以做到800左右，目前样品最高达1700；玻璃基Fast LCD可量产最高PPI可以做到1500左右，样品最高可达2100；硅基OLED可量产最高PPI可以做到4000左右，样品最高可达5000；硅基Micro LED可量产最高PPI可以做到6300左右，样品最高可达14000。

VR屏幕规格目前大概是1寸-3.5寸之间，由PPI速算表可以看出，Fast LCD屏幕现阶段最高可以实现单目3.5K双目7K的水平（PPI≈1500，采用3.5寸），硅基OLED基于当前技术条件可以实现单目4K、双目8K的水平（PPI≈4000，采用1.4寸）。

VR屏幕 PPI速算表							
	硅基OLED			Fast LCD/玻璃基AMOLED			
屏幕尺寸	1寸	1.3寸	1.4寸	2寸	2.5寸	3寸	3.5寸
搭配光学	pancake	pancake	pancake	pancake	pancake/菲涅尔/非球	pancake/菲涅尔/非球	pancake/菲涅尔/非球
2K	2828	2176	2020	1414	1131	943	808
2.5K	3536	2720	2525	1768	1414	1179	1010
3k	4243	3264	3030	2121	1697	1414	1212
3.5K	4950	3807	3536	2475	1980	1650	1414
4K	5657	4351	4041	2828	2263	1886	1616
5k	7071	5439	5051	3536	2828	2357	2020
6K	8485	6527	6061	4243	3394	2828	2424
8k	11314	8703	8081	5657	4525	3771	3232

表3 注：屏幕长宽比例为1：1，标准RGB排列

数据来源：wellsenn XR整理

(四) 像素尺寸

像素尺寸是指屏幕单个像素的大小，像素尺寸通常为构成图像的最小尺寸。单色屏幕中，每个发光像素的尺寸就是该屏幕的像素尺寸，在全彩屏幕中，RGB三个子像素尺寸构成一个彩色像素，该像素尺寸为R、G、B三个子像素构成的像素尺寸。相邻两个像素中心之间的距离称之为像素间距，像素的长宽尺寸一般以相邻两个像素中间的为边界计算测量。

像素尺寸

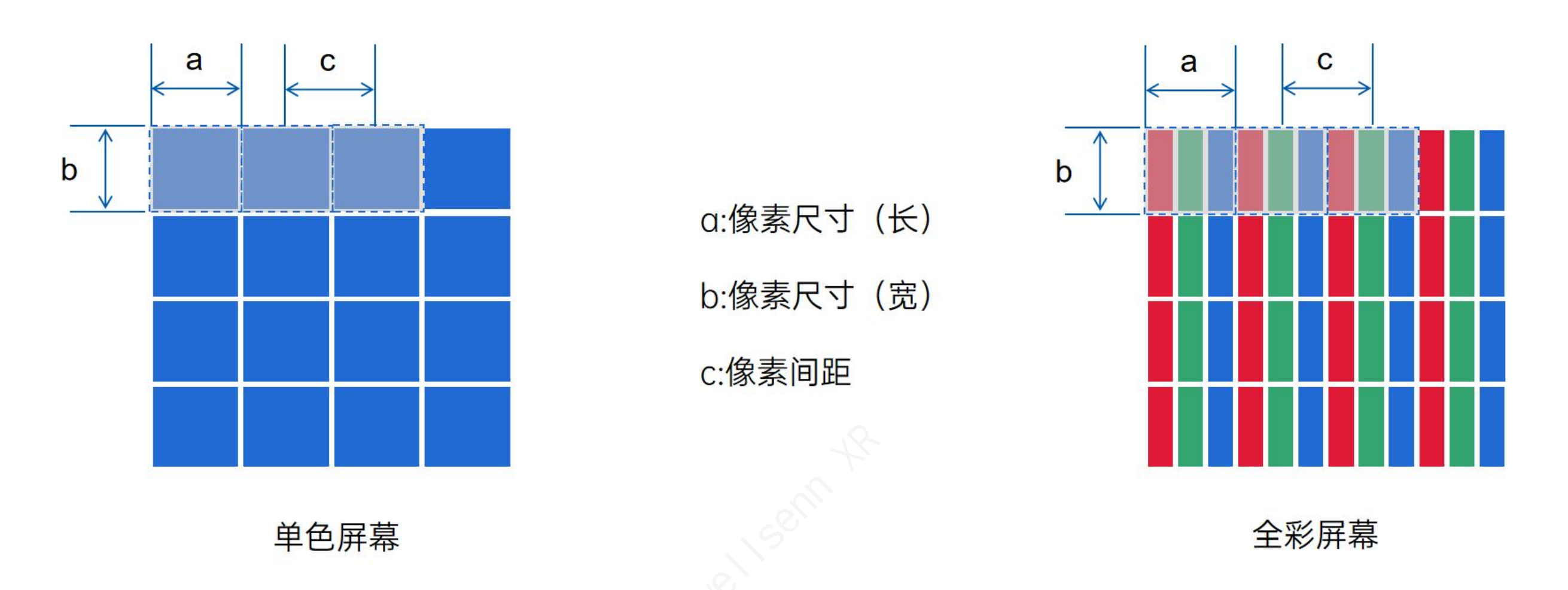


图11 图片来源: wellsenn XR

同等尺寸屏幕下，像素尺寸越小，像素密度（PPI）就越高。全彩的屏幕中，一个单位像素分别由红、绿、蓝三个颜色的子像素构成一个彩色像素，因此像素间距和像素大小相同。

像素尺寸的计算公式为：像素尺寸=屏幕发光区域横（纵）向尺寸/横（纵）向分辨率。目前，AMOLED最小可以做到15um，LCD最小的像素尺寸可以做到12um，硅基OLED最小可以做到4um，Micro led最小可达2um（以上均为非量产样品）。

屏幕像素尺寸与分辨率换算表

屏幕 像素	0.13寸	0.21寸	0.49寸	0.7寸	1寸	1.3寸	1.40 寸	2.1寸	2.5寸	3寸	3.5寸
2um	1167	1886	4400	6286	8980	11674	12572	18859	22451	26941	31431
3um	778	1257	2934	4191	5987	7783	8382	12572	14967	17961	20954
4um	584	943	2200	3143	4490	5837	6286	9429	11225	13470	15715
5um	467	754	1760	2514	3592	4670	5029	7543	8980	10776	12572
6um	389	629	1467	2095	2993	3891	4191	6286	7484	8980	10477
7um	334	539	1257	1796	2566	3336	3592	5388	6414	7697	8980
8um	292	471	1100	1572	2245	2919	3143	4715	5613	6735	7858
9um	259	419	978	1397	1996	2594	2794	4191	4989	5987	6985
10um	233	377	880	1257	1796	2335	2514	3772	4490	5388	6286
11um	212	343	800	1143	1633	2123	2286	3429	4082	4898	5715
12um	195	314	733	1048	1497	1946	2095	3143	3742	4490	5238

表4，注：像素长宽比例为1:1数据来源：wellsenn XR

(五) 角分辨率PPD

PPD (Pixels Per Degree) 角分辨率或称空间分辨率，指视场角中的平均每 1° 夹角内填充的像素点的数量。PPD并不是考量屏幕的直接指标参数，但却是考察XR显示效果最直观的指标。XR的显示效果是屏幕与光学组合后的到达人眼的效果，头显是透过光学系统看屏幕放大的虚拟图像，而不是直接看屏幕，同样的屏幕，光学参数不同，入眼的显示效果差异完全不同，因此通过计算视场角每度的像素数量，是最科学的XR显示参数。

XR的PPD的计算公式为“单目横(纵) 向像素点数量÷单目横（纵）向FOV”或者“单目对角线像素点÷单目对角线FOV”，一般情况，VR/AR屏幕和显示画面为圆形，FOV一般为横向FOV，PPD一般采用单目横向像素点数量÷单目横向FOV方法计算，AR屏幕和显示画面为矩形，FOV一般为对角线FOV，PPD一般采用单目对角线像素点÷单目对角线FOV方法计算。

如某VR头显单目横向FOV为100°，单目屏幕分辨率为2160*2000，那么
PPD=2160÷100=21.6

VR/MR角分辨率PPD

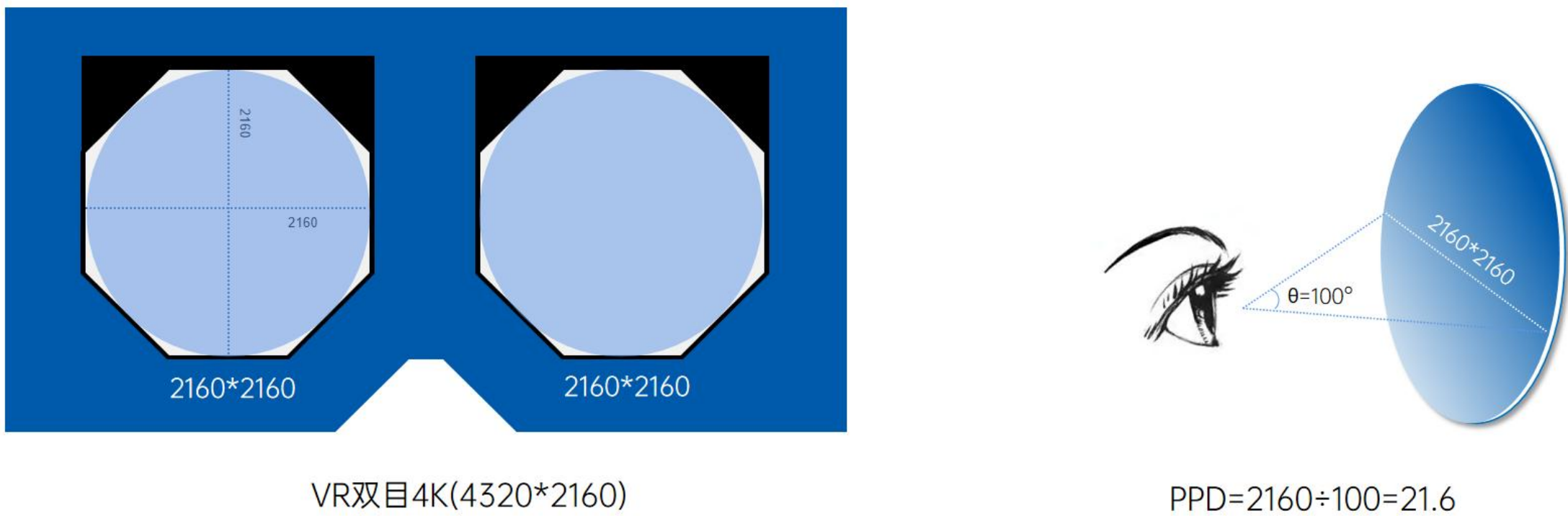


图12 图片来源: wellsenn XR

例如某AR眼镜单目对角线FOV为30°，单目屏幕分辨率为640*480，首先求对角线像素点 $=\sqrt{640^2 + 480^2}=800$ ，则PPD=800÷30=27。

VR/MR角分辨率PPD

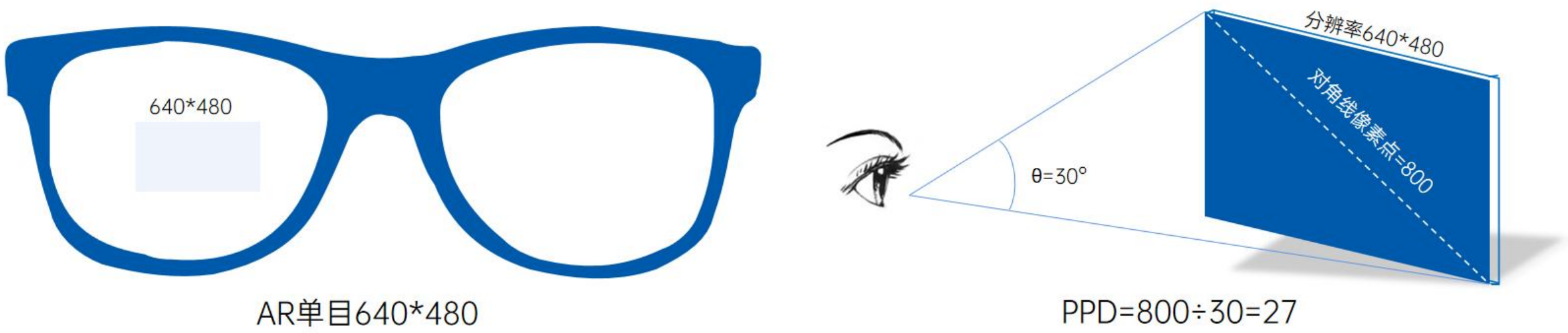


图13 图片来源: wellsenn XR

值得注意的是，XR是双目合像显示（左右眼画面重叠），计算PPD只计算单目PPD。

人眼正常视力下的分辨能力极限约为 60 PPD（视网膜级别 PPD）。当PPD 小于 60 时，人眼正常视力下的能够感受到头显产品的像素晶格感，PPD 越小，晶格感越强烈，这就是俗称的纱窗效应。相反，头显产品的 PPD 越接近 60，产品的成像清晰度就越接近人眼的分辨极限，人眼看图像就觉得越清晰。

通过以下表格可以看出，VR要达到视网膜级别PPD，100°FOV下需要搭配单目6K的屏幕，120°FOV下需要搭配8K屏幕。

VR/MR头显PPD速算表

双目	单目	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°	180°
3.2K	1.6K	20	18	16	15	13	12	11	11	10	9	9
4K	2k	25	22	20	18	17	15	14	13	13	12	11
2.5K	2.5K	25	22	20	18	17	15	14	13	13	12	11
6K	3K	38	33	30	27	25	23	21	20	19	18	17
7K	3.5K	44	39	35	32	29	27	25	23	22	21	19
7K	4K	50	44	40	36	33	31	29	27	25	24	22
12K	6K	75	67	60	55	50	46	43	40	38	35	33
16K	8K	100	89	80	73	67	62	57	53	50	47	44
20K	10K	125	111	100	91	83	77	71	67	63	59	56
24K	12K	150	133	120	109	100	92	86	80	75	71	67

表5，注：FOV为对角线测量，屏幕尺寸比例为1：1数据来源：wellsen XR制表

AR的FOV多采用对角线计算，由下表可以看出，50°FOV的AR，要达到视网膜级别显示，需要搭配2560*1440分辨率屏幕。

AR PPD速算表

单目分辨率	屏幕比例	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°
320*240	4：3	20	13	10	8	7	6	5	4	4
640*480	4：3	40	27	20	16	13	11	10	9	8
800*600	4：3	50	33	25	20	17	14	13	11	10
1024*768	4：3	64	43	32	26	21	18	16	14	13
1280*720	16：9	73	67	37	29	24	21	18	16	15
1600*1200	4：3	100	49	50	40	33	29	25	22	20
1920*1080	16：9	110	73	55	44	37	31	28	24	22
2560*1440	16：9	147	98	73	59	49	42	37	33	29
3840*2160	16：9	220	147	110	88	73	63	55	49	44
5120*2880	16：9	294	196	147	117	98	84	73	65	59

表6，注：FOV为对角线测量数据来源：wellsen XR制表

(六) 亮度

亮度是指发光物体表面发光强弱的物理量称为亮度（luminance），物理学上用L表示。尼特、流明、坎德拉是描述LED显示屏和其他显示产品亮度时经常使用的三个单位。亮度是衡量显示器屏幕发光强度的重要指标，对于显示器面板来说，高亮度也意味着对其工作环境的抗干扰能力更高。

坎德拉（candela）是衡量发光强度的单位，发光强度是一光源所发出的在给定方向上单位立体角内的光通量，用于表示光源发光强弱程度的物理量，国际单位为坎德拉，符号cd。发光强度单位最初是用蜡烛来定义的，1cd相当于一颗普通蜡烛的光强度，因此早期发光强度的单位也称为“烛光”。

尼特（Nit）是衡量亮度的单位，Nit来源于拉丁语的“nitere”，意为照射。表示人眼从一个方向观察光源，在这个方向上的光强与人眼所“见到”的光源面积之比，定义为该光源单位的亮度，即单位投影面积上的发光强度。1尼特（nit）= 1坎德拉每平方米（cd/m2）。尼特数值越大代表显示设备的亮度越高。坎德拉与尼特的关系类似压强和压力的关系。

流明（lm）是光通量的国际单位，光源发射并被人的眼睛接收的能量之总和即为光通量。物理学解释为1坎德拉（cd）在一个立体角（半径为1米的单位圆球上，1平米的球冠所对应的球锥所代表的角度，其对应中截面的圆心角约65°）上产生的总发射光通量。

流明和尼特一个光能量，一个是单位面积上的发光强度，流明可以比作一个手电筒，发光能量如果已经确定，照到的面积越小，当然亮度越高，面积越大，亮度就会低。1尼特=0.093 流明 /平方英尺，假设一个 1000LM 的投影机，投出的面积是 1 平方米（越相当于 60 寸液晶屏的 大小），此时你看到的投影画面的亮度约为 100 尼特。

屏幕亮度单位示意图

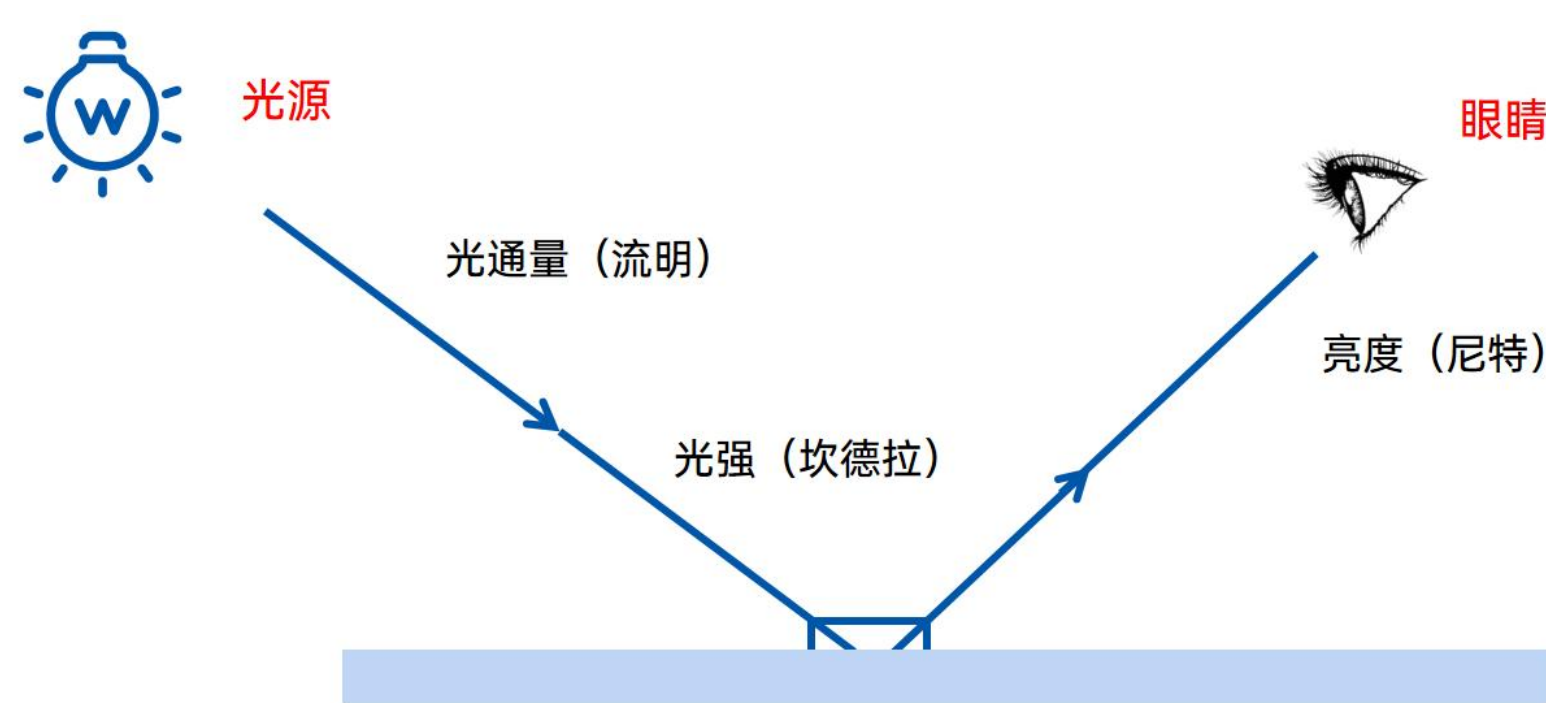


图14 图片来源: wellsenn XR

在衡量发光体的亮度时，一般主动发光体采用发光强度单位坎德拉，如LED；反射或穿透型等被动发光的物体采用光通量单位流明lm，如投影仪；LED显示屏把点光源阵列排在一起，用cd/m²也就是nit表示亮度更为贴切。在显示设备中，主动显示用尼特，被动显示用流明。也可以这样理解，用平面光源的显示设备（例如LCD，OLED以及Mico LED屏幕等）一般用尼特，采用点光源的显示设备（DLP、LCOS、LBS等）用流明。

在XR设备中，衡量亮度一般用尼特来衡量，屏幕发出的光经过光学模组调制后形成画面进入人眼，因此屏幕的亮度并不代表人眼真实看到的入眼亮度，人的眼镜瞳孔也会根据周围环境光的强度自适应调整大小。

在VR全封闭的环境中，入眼亮度需要约150左右尼特，AR眼镜在室内入眼亮度需400尼特，室外正常条件需要1000尼特入眼亮度，室外强光下需要3000尼特入眼亮度才能看得清楚。由于屏幕搭配的光学模组光学效率不同，为了达到各种环境的入眼亮度需求，对屏幕的亮度的亮度也提出了更高的要求，屏幕亮度需求=入眼亮度需求÷光学效率，例如AR眼镜为了达到全天候各个环境的需求，需要最大的入眼亮度要达到3000尼特，如果采用衍射光波导方案（光学效率0.3%），那么对屏幕亮度的需求为3000÷0.3%=100万尼特。

XR屏幕亮度需求								
XR显示入眼亮度需求（nit）		屏幕亮度需求（nit）						
		VR菲涅尔（80%）	VR pancake（15%）	AR棱镜（15%）	AR BB（20%）	AR自由曲面（35%）	AR阵列光波导（8%）	AR衍射光波导（0.30%）
全黑环境	150	188	1000	1000	750	429	1875	50000
室内环境	400			2667	2000	1143	5000	133333
室外环境	1000			6667	500	2857	12500	333333
强光环境	3000			20000	15000	8571	37500	1000000

表7，注：光效和亮度需求仅取均值，仅供参考，VR佩戴只假设全黑环境

数据来源：wellsenn XR整理

（七）对比度

对比度指的是一幅图像中明暗区域最亮的白和最暗的黑之间不同亮度层级的测量，差异范围越大代表对比越大，差异范围越小代表对比越小。严格来讲对比度指的对比度是屏幕上

整个屏幕而言的，例如一个屏幕在全白屏状态时候亮度为500cd/m2，全黑屏状态亮度为0.5cd/m2，这样屏幕的对比度就是1000:1。

LCD屏幕与OLED屏幕对比度比较

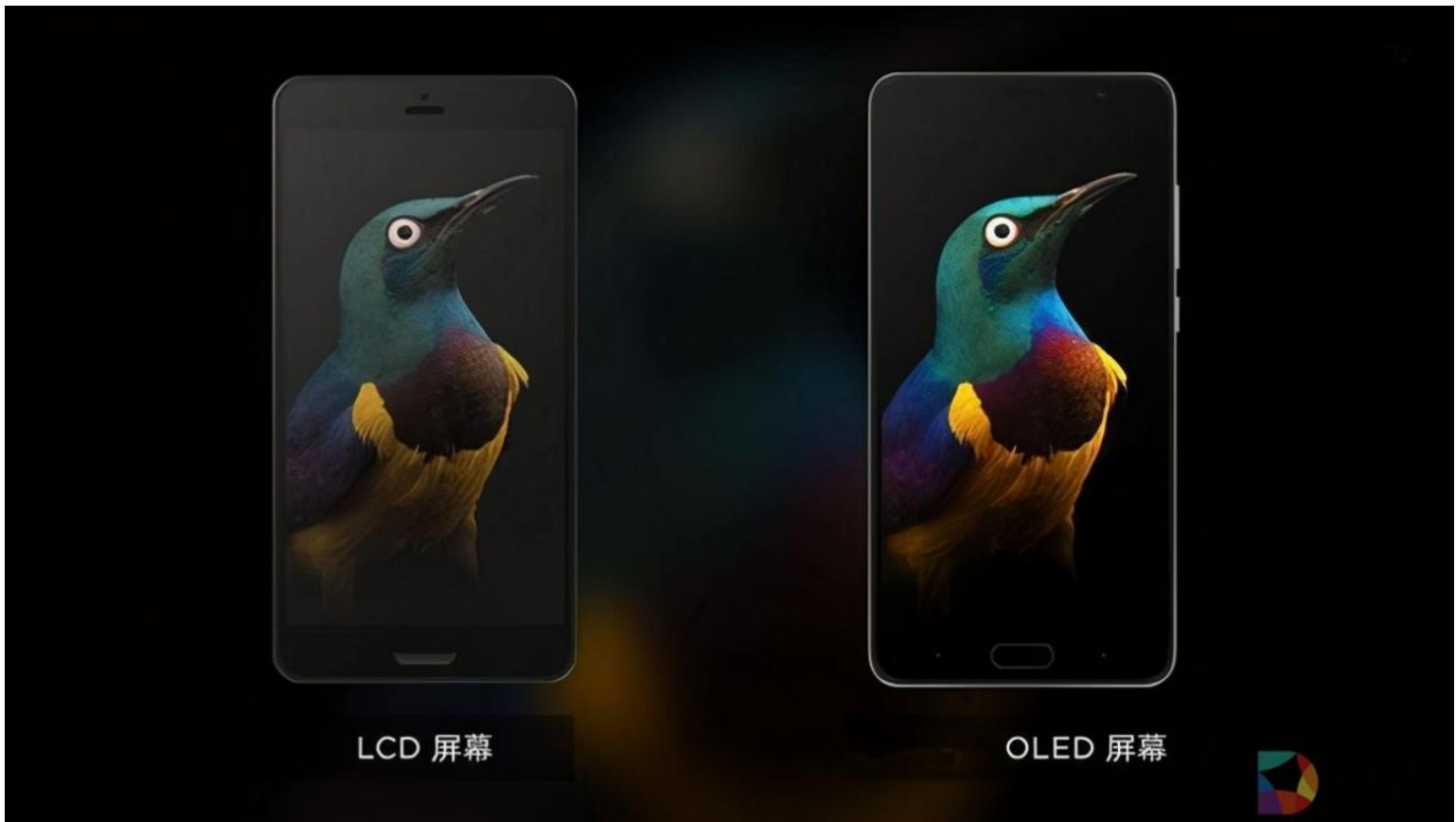


图15图片来源：网络

对比度对视觉效果的影响非常关键，一般来说对比度越大，图像越清晰醒目，色彩也越鲜明艳丽；而对比度小，则会让整个画面都灰蒙蒙的。高对比度对于图像的清晰度、细节表现、灰度层次表现都有很大帮助。在一些黑白反差较大的文本显示、CAD显示和黑白照片显示等方面，高对比度产品在黑白反差、清晰度、完整性等方面都具有优势。

在色彩层次方面，高对比度对图像的影响并不明显。对比度对于动态视频显示效果影响要更大一些，由于动态图像中明暗转换比较快，对比度越高，人的眼睛越容易分辨出这样的转换过程。

自发光的屏幕比背光的对比度要高，以LCD和OLED为例，LCD采用背光的方式，单个像素无法实现全黑，对比度约为1000：1的水平，OLED采用自发光方式，对比度可以达到10000：1的水平。

(八) 刷新率

刷新率是指屏幕画面每秒钟被刷新的次数，通俗一些，刷新率就是一块屏幕每秒钟能刷出多少张图像。例如，60Hz 刷新率的屏幕意味着每秒钟刷新 60 次，也就是说每秒钟在屏幕上显示 60 帧内容。

屏幕刷新率对显示图像效果的影响主要体现在以下几个方面：

操作流畅度：在计算机游戏和媒体播放等方面，屏幕的刷新率会直接影响到操作的流畅度和显示效果。当刷新率较低时，用户进行快速操作时可能会出现卡顿、延迟等现象，而刷新率提高后，操作体验将更加流畅、自然。

延时：高刷新率延迟更低。一个 60Hz 的显示器它每帧的延迟永远不会低于16.67ms ($1000\text{ms} \div 60\text{Hz}$)，而在 120Hz 显示器上这个延迟被缩短到 8.33ms，240Hz 则是 4.16ms。对于XR而言，高刷新率可以降低MTP(Motion To Photons，运动到成像)时延，VR对MTP时延要求通常以不高于20毫秒为目标，如果MTP时延不达标，用户就会觉得眩晕和恶心。

色彩还原：在高刷新率屏幕中，图像的颜色更为鲜艳、明亮，暗细节也更加清晰，能够更真实完整还原色彩。当屏幕刷新率较低时，由于刷新速度过慢，可能直接导致颜色残影、模糊等问题，影响到视觉效果。

能耗：当屏幕刷新率较高时，由于每秒钟更新的次数增加了，因而需要更多的算力来渲染画面，更多的功率来驱动屏幕的刷新。这也意味着需要更高的能耗，也带来更高的发热量。

通常情况需要至少 24 帧才能感觉画面流畅，60hz的屏幕刷新率一般使用在生活中大部分的手机和电视上，已满足人们日常观赏影片的需求。对于一些大型游戏，因为游戏的内容是实时渲染产生的，需要用更好的刷新率看起来才不会卡顿，通常120hz的屏幕刷新率，才会满足流畅无延时，以及精准的强交互操作。

对于视频流，人眼是具备分辨60HZ和120HZ的视觉感受差异的能力的，大部分人临界点在于90HZ，低于90HZ，例如30Hz和60Hz，人眼可以分辨出不同频率下的体验差异，但高于90Hz已经感受不到明显差异了。对于一款合格的XR设备而言，至少需要达到90HZ的刷新率。

人的眼睛基本上每五毫秒刷新一次，五毫秒也就是200HZ，如果帧率高达200HZ以上，人眼感觉到的视频流将与物理世界感受差不多。因此，XR设备的最高刷新率，200Hz基本是最终目标。

屏幕的刷新率与屏幕类型以及驱动方式相关，LCD屏幕由于液晶相应速度较慢，刷新率一般低于自发光的OLED和Micro LED屏。VR采用的LCD屏幕是采用了更快液晶响应速度技术（包括液晶材料以及驱动电路），因此称为Fast LCD，刷新率可以做到90Hz甚至120Hz，而硅基OLED以及Micro LED采用硅基衬底电路驱动，刷新率基本可以达到120Hz甚至140Hz以上。

（九）响应时间

目前行业普遍采用的响应时间，一般指是灰阶响应时间，也就是GTG（Grey To Grey），即一个像素由一个颜色转变为另一个颜色这个过程所需的时间，常规的理解是一个画面切换到另一个画面所需的时间。灰阶响应时间越短，画面色彩越细腻，画面质量也就越高。

响应时间最早来自于LCD屏幕，LCD屏幕上的每一个点，即一个像素，它都是由红、绿、蓝（RGB）三个子像素组成的，要实现画面色彩的变化，就必须对RGB三个子像素分别做出不同的明暗度的控制，以“调配”出不同的色彩。这中间明暗度的层次越多，所能够呈现的画面效果也就越细腻。以8 bit的面板为例，它能表现出256个亮度层次（2的8次方），我们就称之为256灰阶。LCD是控制液晶分子扭转来控制光通过的量，从而实现不同的灰阶。GTG的响应时间是指液晶分子旋转所有灰阶切换过程中所产生的最大响应时间。后来响应时间方法逐步应用到OLED和LED等各种屏幕之中。

屏幕响应时间越短，动态画面时越不会有尾影拖曳的感觉。屏幕刷新率决定的是画面与画面之间切换的平滑程度，而GTG只是决定了画面与画面之间切换是否会产生拖影。响应时间决定了刷新率的高度，正常情况下，屏幕响应时间应该小于屏幕刷新率。

XR屏幕中，Fast LCD是利用overdrive技术提高电压的频率和振幅，以加快液晶分子的转向速度，从而缩短响应时间，Fast LCD顾名思义是响应时间更快的LCD，其响应速度可以达到1ms以下的水平，同源的Lcos显示也属于毫秒级（ms）水平，DLP和硅基OLED的响应速度为微秒级（us）水平，Micro LED的响应速度为奈秒(ns)水平。

（十）色深/灰阶

色深（Color Depth）也称为色彩深度，色彩深度是计算机图形学领域表示在位图或者视频帧缓冲区中储存1像素的颜色所用的位数，它也称为位/像素（bpp）。色彩深度越高，可用的颜色就越多。色深用 bit 数来表示数码影像色彩数目的单位。色深最精准的定义并不是指的涵盖了多少种颜色，而是同一种颜色到底拥有多少种灰阶（可以简单理解为一种颜色的不同亮度）。

色彩空间的三原色是红(R)绿(G)蓝(B)，每种颜色由独立的通道表示，而色深便是对每个通道的灰阶定义。灰阶，是将最亮与最暗之间的亮度变化，区分为若干份。

色深与灰阶关系为：灰阶=2^色深位数。1 bit 的影像等于 2 的 1 次方 (= 2) 灰阶，只能表现黑与白两种颜色。2 bit 的影像，则是 2 的平方 (= 4)灰阶，可以表现 4 种颜色，所以除了黑白之外，还可以表现它们之间的两种灰调。而 3 bit 的影像，就是 2 的 3 次方 (= 8)灰阶，表示在一幅黑白或灰阶的照片中，可以表现出包括黑白在内的 8 种灰阶。

灰阶

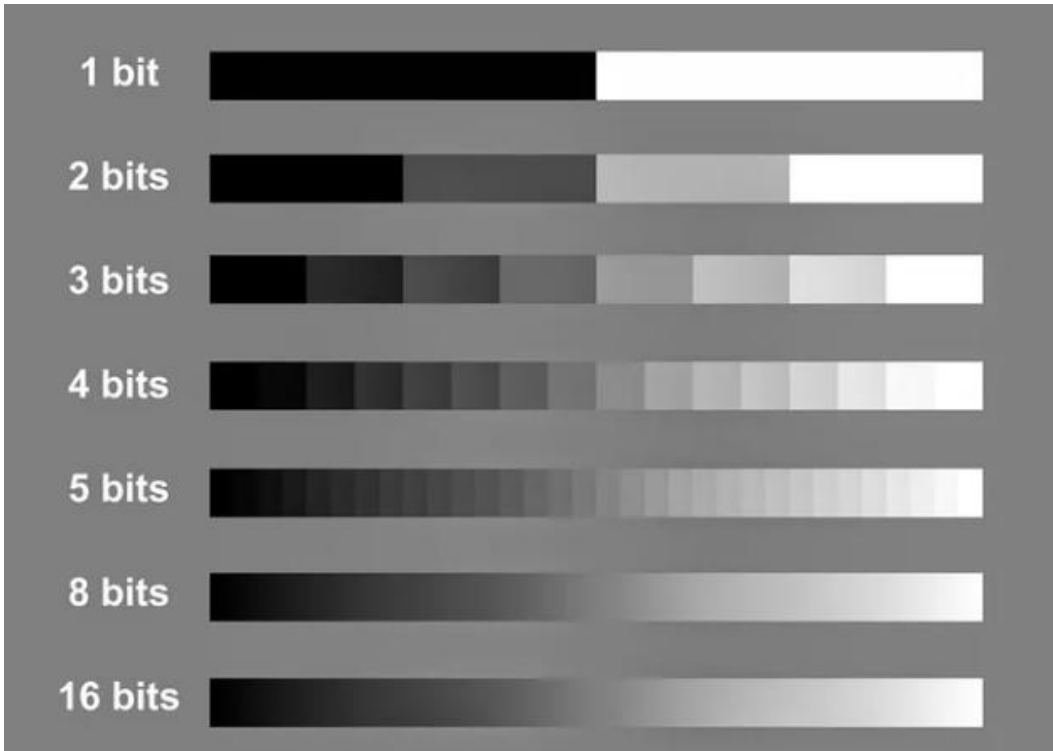


图16图片来源：网络

从上图可以看出，灰阶级数越多，色彩过渡越平滑。换言之，屏幕色深位数越高，显示画面的色彩变化越平滑。当屏幕色深过低，灰阶不足，在某些场景下便会出现颜色断层。

屏幕的像素点由三颜色组合而成，以8bit色深为例，R、G、B每个像素可以生成：28=256，RGB三个颜色合计可以生成256×256×256=16777216种颜色。10bit则可以产生1073741824种颜色。

Bit对应颜色种类



图17图片来源：wellsenn XR

目前市场上主流Fast LCD屏幕一般为8bit色深，256级灰阶(单通道)，1670万色数。也有部分OLED屏幕可以达到10bit，1024色阶，10亿色数。

11. 色域

色域又称为色彩空间，它代表了一个色彩影像所能表现的具体情况。光是一种波，人眼视网膜中的视锥细胞能识别的波长数值范围在380~780纳米，这部分被称之为可见光。将所有可见光的颜色信息和明度信息，通过一定的数学变换映射到一个平面上，就得到了一个马蹄形的区域，称为CIE-1931色域色度图，也是人眼可以识别的全部颜色。

CIE-1931色域色度图

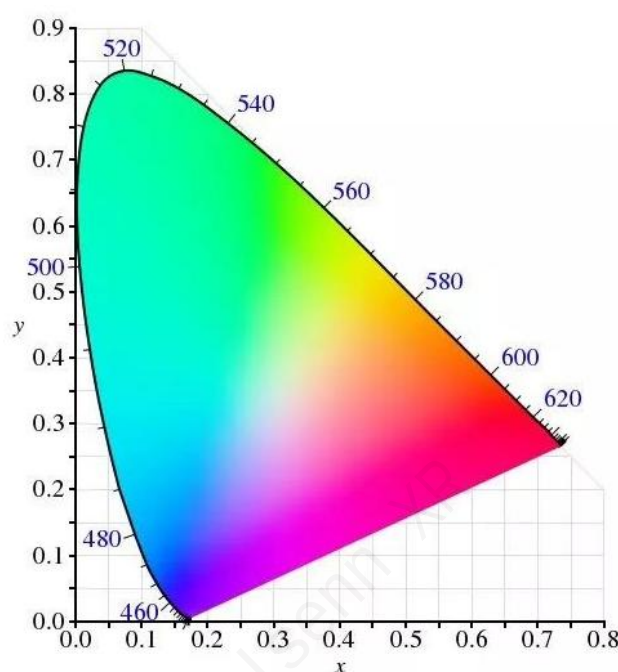


图18 图片来源：网络

显示器上每一个像素的颜色都是由红光（Red），绿光（Green），蓝光（Blue)混合而成。这也是光的三原色。用户所能看到的屏幕显示色彩范围是依赖于红绿蓝三个子像素混合之后得出的，所以一台显示器显示颜色的极限，就是红绿蓝各自显示极值最大点连线的内部，这个三角形区域代表了显示设备所能显示的全部颜色，这就是显示设备的色域。色域覆盖越广的显示器，显示的颜色越丰富；反之，显示的颜色越匮乏。

高色域的色彩更鲜艳，暗部细节更丰富，低色域会导致我们看同一张图片时，无法显示它原始的色彩，画面泛白。

色域对比

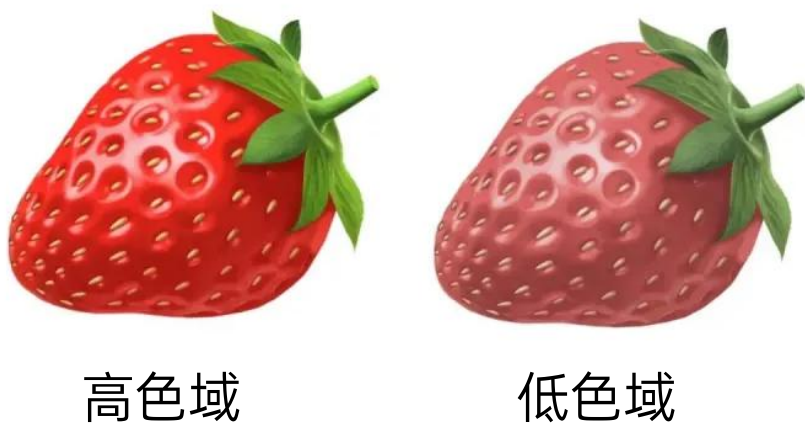


图19 图片来源：网络

当前最尖端的显示技术仍然无法完全实现CIE-1931的全部色彩，所以根据在摄影、摄像，印刷等领域应用，各行各业制定了相应的色彩标准，并在CIE-1931色域色度图中选择特定的区域作为标尺，定义了多种色域标准。

在显示器领域常用的标准有四种：sRGB、Adobe RGB、NTSC、DCI-P3。
sRGB色域，由微软公司和惠普公司主导，是早期的色域标准之一，它代表了红绿蓝三种基本色素，当sRGB色域值为100%时，也就意味着该显示器能够显示sRGB色域空间中的全部色彩。sRGB是windows系统的UI和各类软件中默认应用的色域，也是互联网中图形图像信息的标准色域。sRGB色域在CIE-1931中覆盖面积约为30%，绿色部分的覆盖率较低，色彩还原度有限，目前市面上大部分显示器都能轻松达到96%以上的sRGB色域覆盖。

Adobe RGB色域，是随着摄影技术而发展起来的专业色域标准，这种色域较之sRGB有更宽广的色彩空间，它包含了sRGB所没有的CMYK色域，其包含了更多的青色和绿色，还包含sRGB色域没有覆盖的CMYK色彩空间，Adobe RGB色域在CIE-1931中覆盖面积约为50%，Adobe RGB色域标准是打印机、印染业、很多软件和网站的默认色彩空间。

DCI-P3色域，主要由美国电影行业提出，是数字影像领域中比较新的色域标准，着重人类视觉的真实体验，匹配电影的色彩表现要求。相比sRGB色域，其覆盖了更多的红色和绿色空间，DCI-P3色域在CIE-1931中覆盖面积约为45.5%。DCI-P3色域主要应用于数字影视领域，它注重视觉冲击力，具有比传统 sRGB色域更广的红色/绿色色域。

NTSC色域，是由美国电视标准委员会制定的一个色域空间标准，NTSC色域在CIE-1931中覆盖面积约为48%，它比sRGB、DCI-P3这两个色域空间的范围都要广，适用于广色域电视标准。

色域标准对比表

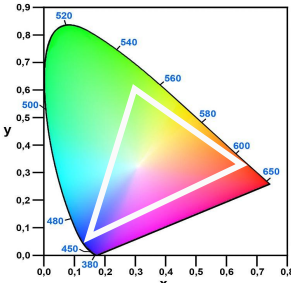
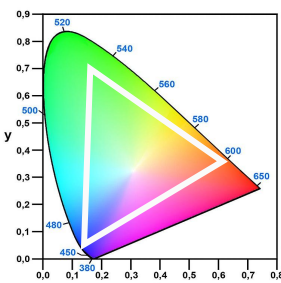
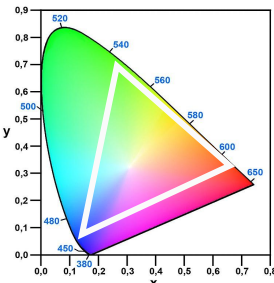
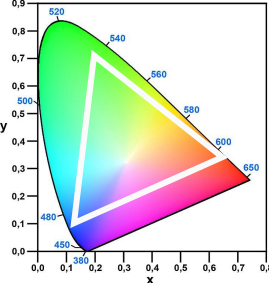
	sRGB	Adobe RGB	DCI-P3	NTSC
				
人眼可见色彩覆盖度	30%	50%	45.5%	48%
标准主导企业/行业	微软、惠普	Adobe	美国电影行业	美国国家电视标准委员会
主打场景	普通办公，windows系统和大部分浏览器的通用色彩标准	打印机、印染业，艺术微喷、专业摄影等	电影、游戏、大屏数字电视	广播电视
应用设备	手机、电脑等	专业显示器	电影	电视
优缺点	几乎没有覆盖绿色色域，在花草和森林之类的场景中缺乏色彩表达，但兼容性很好，可以让图片在不同的设备中保持色彩基本一致	拥有更宽广的色彩空间，良好的色彩层次表现，宽容度也更高，颜色更加鲜艳丰富	色域范围比 sRGB 覆盖更广，能够在低亮度下准确呈现更多的颜色调整，与其他颜色标准相比，具有更广泛的红色/绿色	NTSC色域比sRGB的色域容积大得多

表8数据来源：wellsenn XR整理

XR设备目前一般采用s RGB为基础标准，例如Xreal air、Rokid max等AR观影眼镜采用的索尼0.68寸硅基OLED屏幕，对外宣传一般为108% sRGB色域，其意思是比sRGB色域数量要高出8%，也有部分采用DCI-P3或者NTSC标准，例如视涯推出的1.03寸2.5K硅基OLED屏幕，采用DCI-P3标准，色域为94% DCI-P3 色域，其含义是指达到DCI-P3色域的94%；华星光电2022年发布的2.1英寸Fast LCD屏采用NTSC标准，NTSC色域为70%，其含义是指达到NTSC色域的70%。因为每种色域的标准不同，不同标准色域的数据比较难以直接对比。需要在同等色域标准下对标才有直接意义。

四、XR屏幕市场规模

（一）全球XR屏幕市场规模

显示屏幕是XR设备的核心器件，销量依赖于XR硬件出货规模，预计2025年全球XR显示屏幕市场规模为14亿美元，2030年全球XR显示屏幕规模达200亿美元，到2035年，预计全球XR屏幕市场规模达830亿美元规模。

全球XR屏幕市场规模（单位：亿美元）

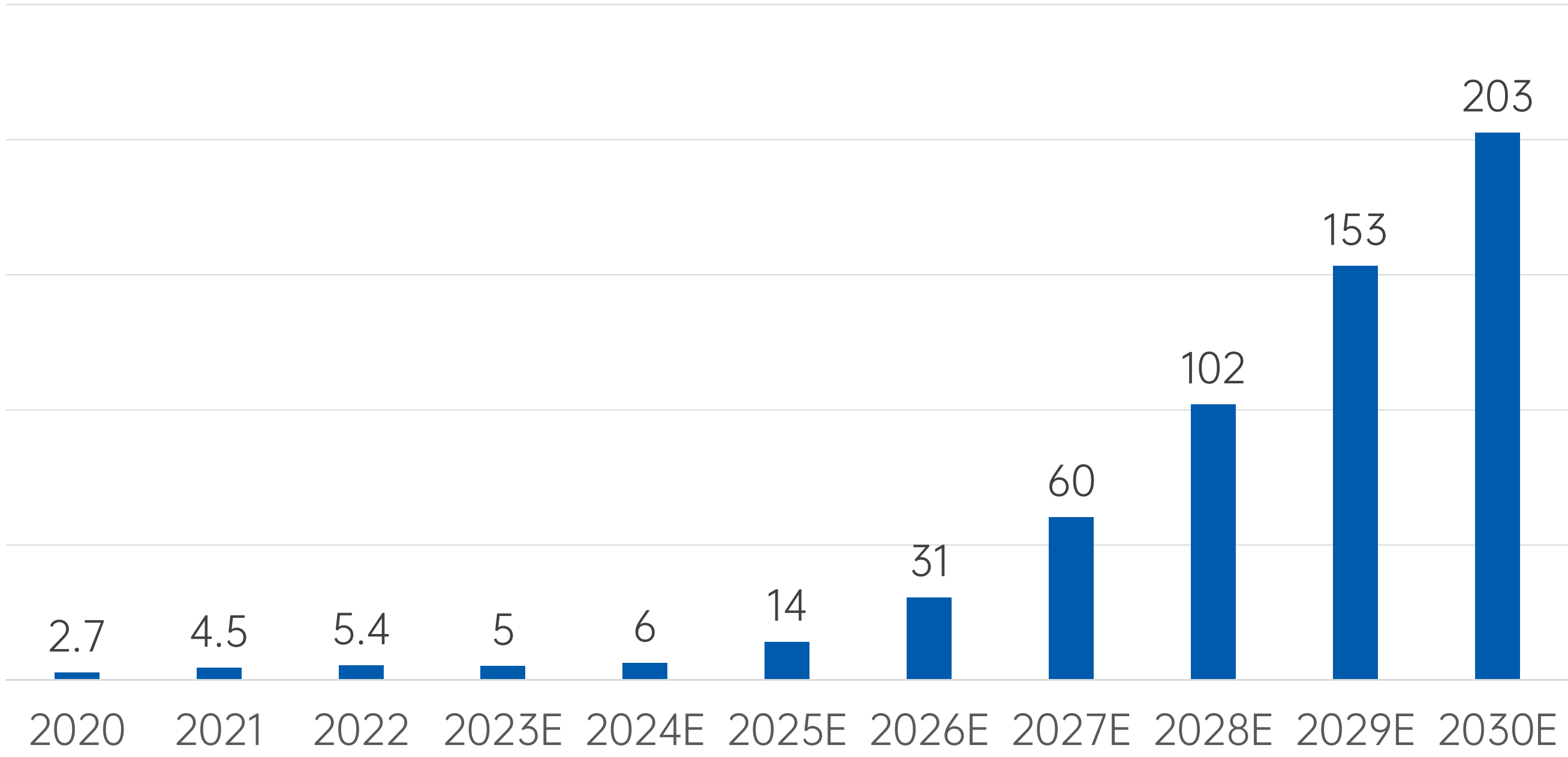


表9数据来源：wellsenn XR

(二) VR/AR屏幕分类市场规模

2025年，预计全球VR屏幕市场规模12亿美元，AR屏幕市场规模为1亿美元，2030年，全球VR屏幕市场规模达123亿美元，AR屏幕市场规模达80亿美元。

VR/AR屏幕分类市场规模（单位：亿美元）

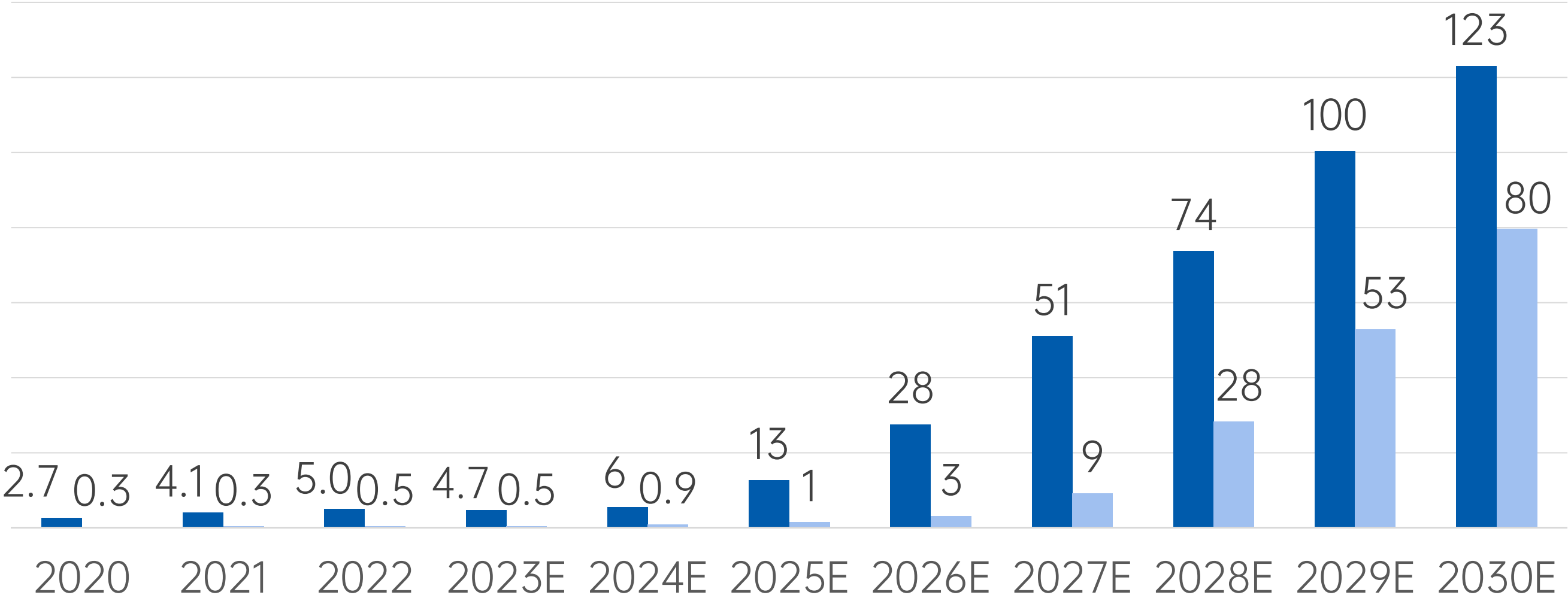


表10

数据来源：wellsenn XR

(三) 不同类型型屏幕XR市场规模

预计2025年，XR领域LCD屏幕市场规模为6.8亿美元，在VR领域市场份额为86%；到2030年达24亿美元，在VR领域市场份额为40%。

全球XR市场LCD屏幕市场规模（单位：亿美元）

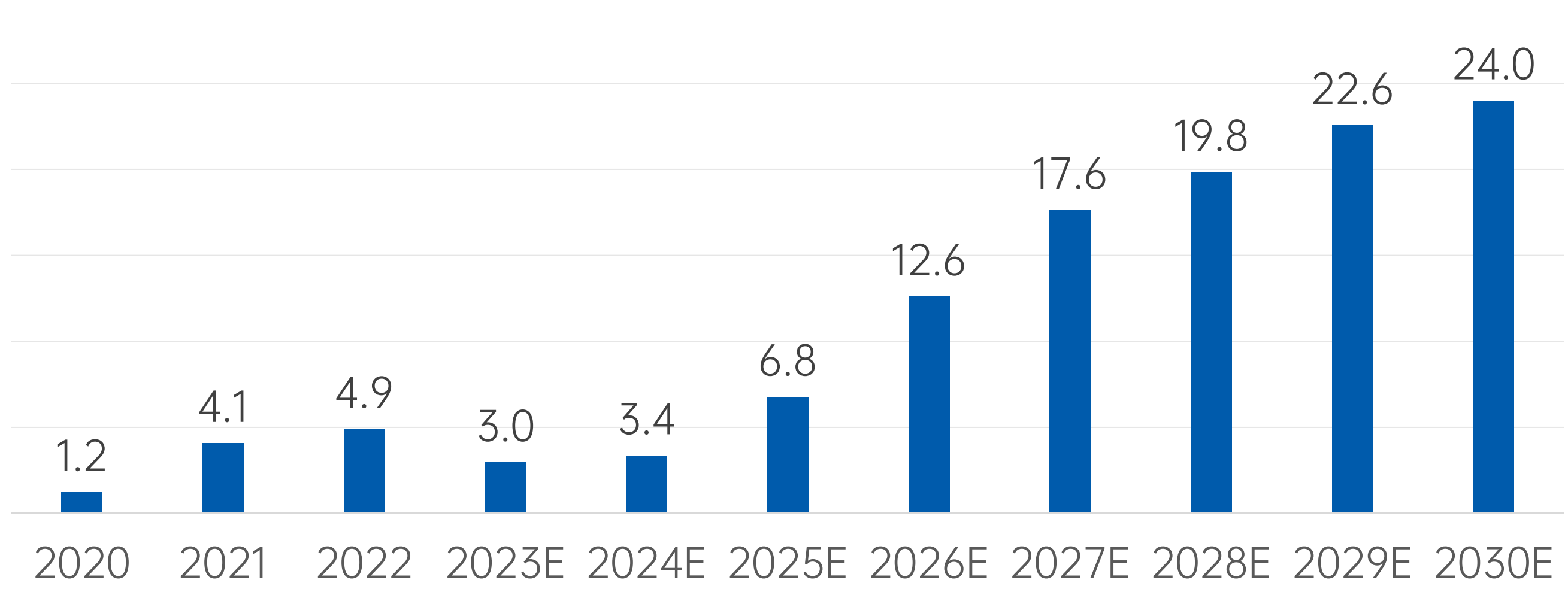


表11

数据来源：wellsenn XR

预计2025年，XR领域硅基OLED屏幕市场规模为6亿美元，在VR领域市场份额为9%，到2030年达94亿美元，在VR领域市场份额为50%。

全球XR市场硅基OLED屏幕市场规模（单位：亿美元）

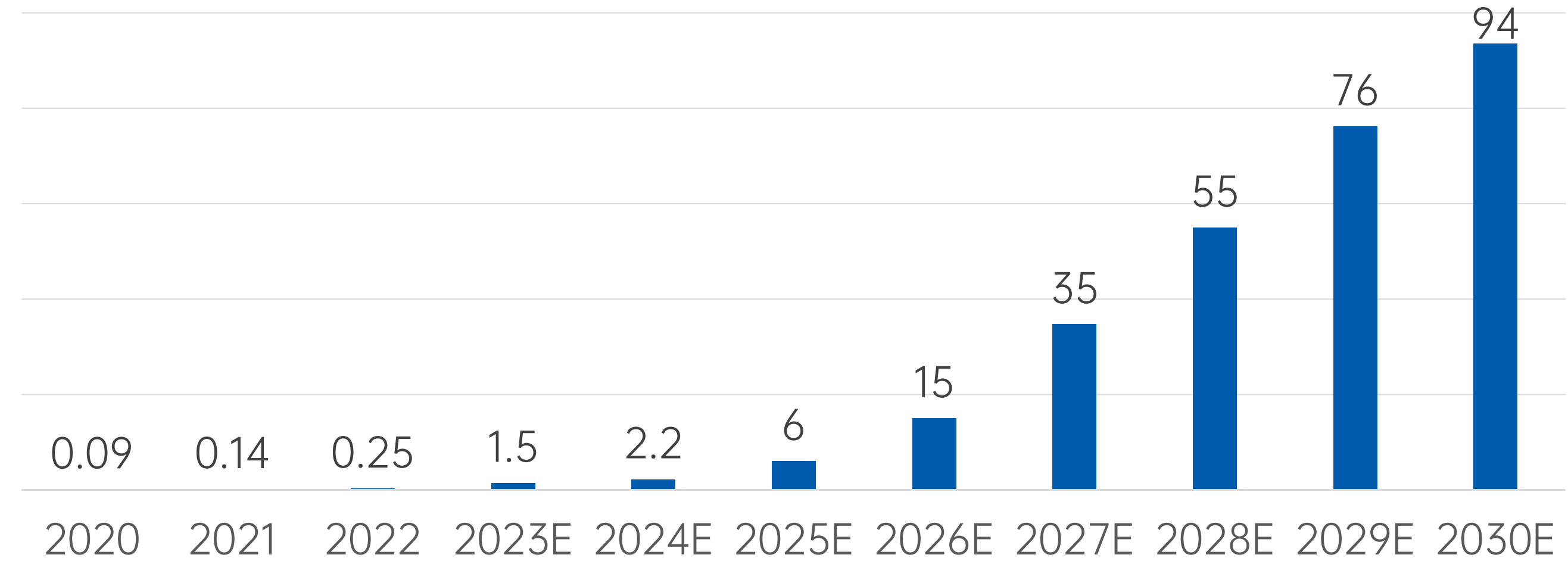


表12数据来源：wellsenn XR

预计2025年，XR领域Micro LED屏幕市场规模为0.5亿美元，AR领域市场份额为25%，到2030年达76亿美元，AR领域市场份额为95%。

全球XR市场Micro LED市场规模（单位：亿美元）

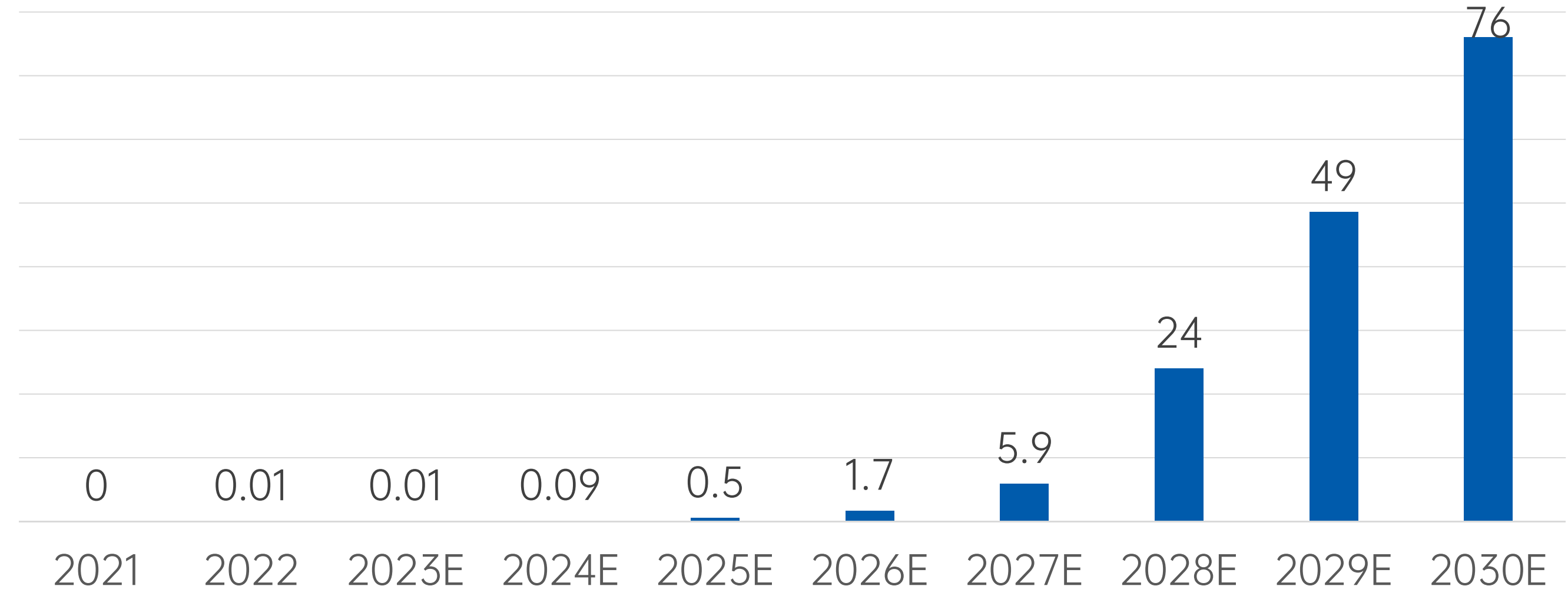


表13数据来源：wellsenn XR



公众号



XR显示屏幕交流群

维深信息Wellsenn XR是VR/AR/MR产业垂直研究机构，公司专注于对VR/AR/MR产业上游供应链和整机，中游VR/AR/MR软件、下游VR/AR/MR内容以及应用场景的系统性跟踪和研究，以定量分析为主定性分析为辅、通过自上而下和自下而上相结合的研究方法，为VR/AR/MR从业者和投资者提供及时的、客观的、全面的、有前瞻性的数据分析、行业研究和咨询服务。