

2023 年版

AR/VR/MR 機器の技術と関連部材

～Apple Vision Pro が示すデバイスと材料の発展方向～

2023年11月30日

(有)カワサキテクノリサーチ

企画・編集協力：テック・アンド・ビズ（株）

内容

第1章	AR/VR/MRの機器と市場	1
1-1.	AppleのARセットで『空間映像時代』の幕開けとなった2023年	1
1-2.	Apple Vision Proの構成と機能(概要)	2
1-3.	AR/VR/MR機器の分類と対象市場	6
1-4.	AR/VR/MRの市場予測	9
第2章	2023年の世界のイベントで見るXR(AR/VR/MR)の最新動向	13
2-1.	CES(Consumer Electronics Show)、1月@Las Vega	13
2-2.	SPIE AR VR MR Exhibition、1月@San Francisco	30
2-3.	ICDT国際会議と展示会、3月@中国南京	40
2-4.	Touch Taiwan 展示会、4月@台北	49
2-5.	World Metaverse Ecology Expo、5月@広州	54
2-6.	SID/Display Week 国際会議と併設展示会、5月@Los Angeles	56
2-7.	AWE(Augmented World Expo) USA、5月@Santa Crala	73
2-8.	MWC(Mobile World Congress)上海、6月@上海	78
2-9.	K-Display、8月@韓国 Seoul	80
2-10.	IMID(International Meeting on Information Display)、8月@韓国 Busan	88
2-11.	DIC(Display Innovation Convention and Expo)、8月@上海	95
2-12.	CIOE(China International Optoelectronic Exposition)、9月@中国深圳	99
2-13.	IDW(International Display Workshops)、12月@新潟	112
第3章	AR/VR/MRのキーデバイス(ディスプレイ)	114
3-1.	LCD(液晶ディスプレイ): 構造、特徴、性能、など	115
3-2.	LCoS(反射型液晶): 構造、特徴、性能、など	118
3-3.	DMD(Digital Micromirror Device): 構造、特徴、性能、など	119
3-4.	OLEDおよびマイクロOLED: 構造、特徴、性能、参入企業など	120
3-5.	マイクロLED: 構造、特徴、性能、製造プロセス、など	127
3-6.	レーザー(網膜描写): 構造、特徴、性能、など	132
第4章	光学系	135
4-1.	基本光学系	135
4-2.	VRおよびビデオパススルー光学系	138
4-2-1.	Fresnel(フレネル)レンズ系	138
4-2-2.	Pancake(パンケーキ)レンズ系	142
①	Meta社の動き	142
②	パナソニック社の動き	144
③	HTC社の動き	145

④	Apple 社の動き	146
⑤	Varjo 社の動き	149
⑥	Meta 社の動き II (開発アイテム)	150
⑦	Apple 社の動き II	151
4-2-3.	波動光学系	156
4-3.	AR 光学系.....	160
4-3-1.	プリズム方式	160
4-3-2.	Birdbath 方式.....	162
4-3-3.	レーザースキャニング方式.....	164
4-3-4.	Waveguide 方式.....	166
①	各種方式とその技術概要	166
②	Coupler の構成.....	174
③	Exit Pupil Expansion (EPE)展開.....	179
④	回折パターン形成	180
⑤	Holographic Waveguide	185
4-3-5.	樹脂レンズ展開	187
4-4.	その他のニアアイディスプレイ光学系.....	191
4-4-1.	外部レーザーによる網膜直接投影.....	191
4-4-2.	コンタクトレンズディスプレイ.....	196
4-5.	XR 光学系部品市場.....	200
4-5-1.	光学樹脂レンズ市場	200
4-5-2.	導光板用ガラス基板市場.....	202
4-5-3.	回折光学素子材料/ホログラム光学素子材料市場	204
第 5 章	車載ディスプレイ	206
5-1.	車載 HUD(Head up Display)	206
5-2.	自動運転で変わる車内空間とディスプレイ	220
第 6 章	XR 機器のセンサー	224
6-1.	XR 機器は最新の技術でできている	224
6-1-1.	モーションセンサー	225
6-1-2.	カメラ	226
6-1-3.	LiDAR	226
6-1-4.	超音波センサー	227
6-1-5.	マイク	227
6-1-6.	赤外線センサー	227
6-1-7.	アイトラッキングセンサー.....	228
6-1-8.	脳波センサー	228

6-2. Apple Vision Pro とそのセンサー構成	231
6-2-1. AVP のセンサー	232
6-2-2. AVP に関する特許	238
6-3. センサーとソフトウェア	242
6-3-1. SLAM 技術	242
6-3-2. オクルージョン処理	244
6-3-3. AI によるセンサーの補完技術の例(カメラによるトラッキング、エペ) ...	245
6-3-4. エッジセンサー	247
6-3-5. センサーフュージョン	248
6-4. LiDAR センサー	249
6-4-1. 用途別 LiDAR の種類と動向	249
6-4-2. LiDAR の構造	250
6-4-3. LiDAR の投光素子	251
6-4-4. LiDAR の受光素子	252
6-4-5. 有機 CMOS イメージセンサー	254
6-5. 2023 年ノーベル化学賞「量子ドット」を用いたセンサー	255
6-6. ブレインコンピューティング	258
6-7. XR 機器の医療への応用	260
6-8. MEMS 技術	262
6-9. ヘッドセットの出荷台数の推移と予測	267
第 7 章 高速通信技術	268
7-1. 高周波無線通信の変化	269
7-2. 有線通信の変化	272
第 8 章 まとめ	276

第1章 AR/VR/MR の機器と市場

1-1. Apple の AR セットで『空間映像時代』の幕開けとなった 2023 年

映像を映し出す FPD (Flat Panel Display: 平面ディスプレイ) は、2023 年に産業化 50 周年の節目を迎えている。最初の商品は、1973 年のシャープの電卓とセイコーエプソンの時計に液晶ディスプレイを搭載した物である。その後、FPD はノートパソコンやモニターを経て大画面テレビへ進化し、近年ではスマートフォンやスマートウオッチなど小型化して持ち運ぶ機器として人々の必需品となっている。これらはいずれもディスプレイ表面に映像が映し出される『平面ディスプレイ』であるが、ここ数年注目され始めたのが、空間に映像を映し出す AR/VR (Argument reality/Virtual reality) の技術とその製品である。VR ヘッド (HMD: Head Mount Display と呼ぶ) や AR グラスである。

この空間に映像を映し出す機器として業界の人々が待ち望んでいたのが Apple によるこの分野への参入である。Apple は 2007 年に発表した iPhone で、スマートフォンの巨大市場を作り上げ、今日までの十数年間市場を牽引してきた。その Apple が次に狙うのがスマートフォンを置き換える新たな市場である『空間映像』の機器である。その機器が 2023 年 7 月に、Apple から発表された。「Apple Vision Pro」である。

奇しくも、FPD 産業化 50 周年の 2023 年に発表されたこの商品を、Apple 自身は『空間コンピューティング』と命名してアピールしている。ディスプレイの次の 50 年のスタートを飾るにふさわしい商品になるであろう。iPhone の様に平面ディスプレイ上のタッチパネルで全ての操作を行う機器ではなく、仮想空間の中で、目の動きや指の動きで機器を操りながら操作を行う全く新しい概念のデバイスになる。

本技術資料集では、注目される Apple Vision Pro に至るこれまでの様々な AR/VR 機器や企業の動向、その技術や使われている部材の状況を整理しながら、今後普及が進むと思われる Apple Vision Pro そのものの機能や機器構成を読み解き、今後の発展方向なども分析していく。

1-3. AR/VR/MR 機器の分類と対象市場

一般的な定義として、AR (Augmented Reality) は「拡張現実」として現実の風景に仮想の映像を重ね合わせるものであり、眼鏡型の「AR グラス」が用いられる。VR (Virtual Reality) は「仮想現実」として現実世界とは切り離された仮想の空間に映像を映し出すものであり、ゴーグル型の HMD (Head Mounted Display) が用いられる。

現状では、AR 機器と VR 機器は、それぞれに一般消費者向け市場と企業向け市場に分けて議論されている。企業向けとしては、高度な処理が行えるように様々な機能を盛り込むため価格も高くなる。一般消費者向けでは、特定の用途にフォーカスし普及を図る為に手頃な価格帯に押さえている。

一方、MR (Mixed Reality) は、AR をより高度化したものと捉えることができ、センサーなどを駆使し現実世界の実物と仮想物体とをびったりと重ね合わせて操作する機能を持たせた物である。最近では、VR 機器にカメラを搭載して周囲の風景を取り込みながら VR 空間で重ね合わせながら操作するという使い方も増えてきたため、将来は AR と VR が融合し MR の方向へ向かうと考えることもできる (図 1-6)。

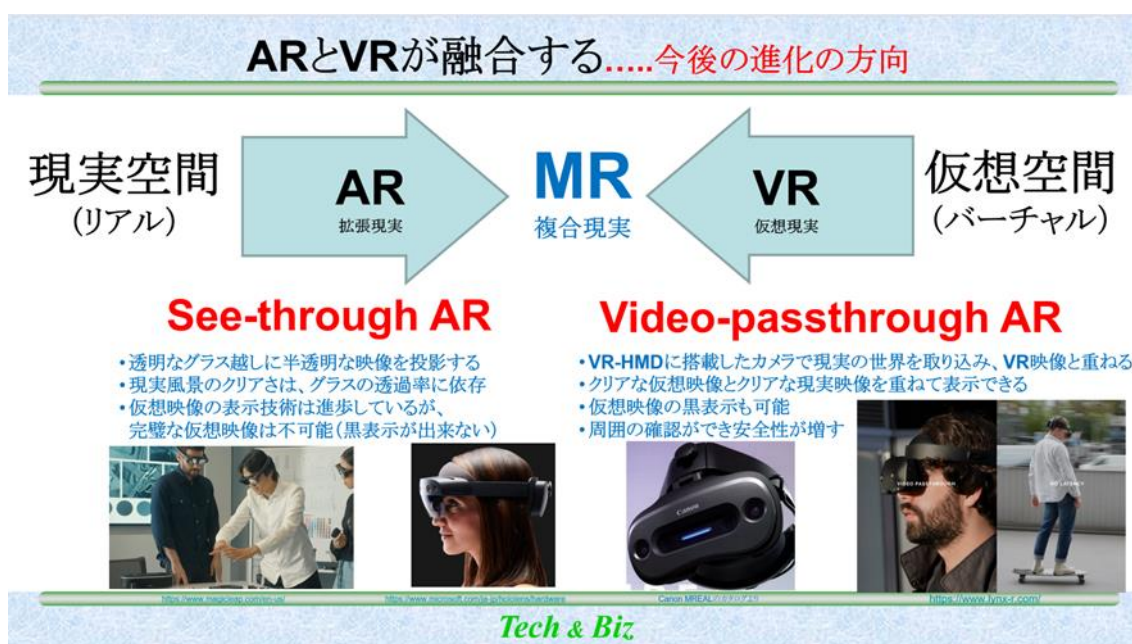


図 1-6 AR と VR は融合していく

第2章 2023年の世界のイベントで見るXR（AR/VR/MR）の最新動向

AR/VR/MRに関連するイベントが世界各地で開催されており、そのホットな状況や技術や製品の動向を肌で感じることができる。本章では、2023年の年初から開催されてきたこれらのイベントの概要、AR/VR/MR関連の展示内容などを開催順に紹介する。

2-1. CES (Consumer Electronics Show)、1月@Las Vega

毎年1月第一週にLas Vegasで開催される世界最大の家電ショー。注目される最新技術や製品を年の初めに見ることで、その年の方向を知ることができる。会場はLas Vegasの市内に分散し、会期中は世界中から集まった大勢の参加者が街中を行き来して賑わう(図2-1)。LVCCの地下には特斯拉車が走るトンネルでも繋がれており、車の未来を体感することも出来る(図2-2)。



図 2-1 CES の会場全景と Las Vegas の会場分布図

展示会場はLas Vegasの中心部3カ所に分散し、この中のTech Eastが中心的かつ巨大な会場である。この他にカンファレンスの別会場もある。各会場間はシャトルバスやモノレール等で移動する。(写真はTech East 隣接のWest Gate Hotelより、2023年1月撮影)

2-3. ICDT 国際会議と展示会、3月@中国南京

ICDT (International Conference on Display Technology)は、中国で開催されるディスプレイの国際会議であり展示会も併設されている。Display 国際会議 SID の傘下で2017年に中国内で初開催されて以降、毎年中国各地で開催されてきた。2020年以降はコロナ禍の影響で開催時期が変動したが、2023年は3月に南京での開催となった。ディスプレイ国際会議として様々なディスプレイ技術の学術発表もあるが、本資料集では併設展示会の様子を以下に記載する。

図 2-29 は、展示会場の様子と展示会場のレイアウト図である。「BOE」「TCL 華星 (TCL-CSOT)」「Tianma(天馬)」といった大手のディスプレイパネルメーカーが様々な最新の技術や製品を展示している。その中に混じって、マイクロディスプレイを手がける JBD や芯視元といった企業の展示も有り、後の頁で紹介する。

このようなディスプレイの展示会は、ディスプレイ技術の専門家や関連企業が最新のインノベーションを共有し、ビジネスチャンスを探るための国際的なプラットフォームとなっており、後述する本家の米国 SID を始め、世界の各地で開催されている。



図 2-29 中国南京で開催された国際会議 ICDT2023 の併設展示会

国際会議の併設展示会であるため、会議の合間の休憩時間や見学時間として儲けられた時間帯には大勢の見学者で賑わう。

2-6. SID/Display Week 国際会議と併設展示会、5月@Los Angeles

SID/Display Week は世界最大のディスプレイイベントである。毎年、米国で1週間、学術的な国際会議を中心にして併設展示会やビジネスカンファレンス、セミナー等々の様々なイベントが繰り広げられている。2023年は5月21日から26日までロサンゼルスで開催された（図2-46）。



図 2-46 SID/Display Week の 2023 の概要

（左上）会場入口の風景。今年がSID設立60周年にあたり、会場内に記念の看板も掲げられた。同時に2大スポンサーとなった中国の天馬とBOEもそれぞれ40周年と30周年となり、2023年がディスプレイ産業の節目の年となった。

（左下）国際会議初日のキーノート講演。中国の天馬、Magic Leap、米国調査会社DSCCが講演した。

（右）Display Week 2023のウェブサイト。会期中に開催される様々なプログラムが記載されている。シンポジウム、短期コース、セミナー、ビジネスカンファレンス、基調講演、CEOフォーラム、女性技術者の会議などが含まれている。また、展示会やパーティーなど、イベントの詳細情報に簡単にアクセスできるリンクが提供されている。

2-7. AWE (Augmented World Expo) USA、5月@Santa Clara

AWE (Augmented World Expo) USA は、AR/VR のビジネスにフォーカスした世界最大のイベントである。2023 年の AWE USA は、SID/Display Week の翌週 5 月 31 日から 6 月 2 日にかけてカリフォルニア州サンタクララで開催された (図 2-60)。

前節の SID/Display Week が技術にウエイトを置いた国際会議であるのに対して、AWE はビジネスサイドにウエイトを置いた展示会ベースのイベントである。参加企業がカンファレンスで技術や製品をアピールするといった形を取っており、多くの人々が情報収集とネットワーク作りを目指して参加し、ホットなディスカッションを繰り返している。

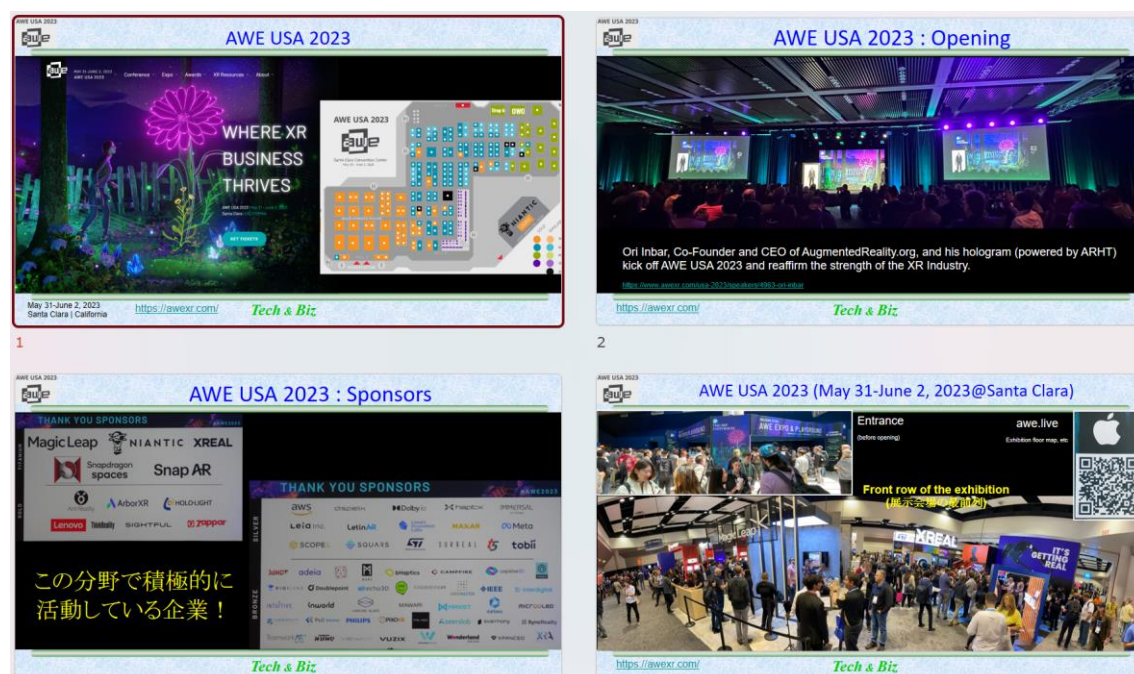


図 2-60 AWE USA イベントのイメージ

(左上) イベントの HP と展示会場図、(右上) オープニングのキーノート講演。

(左下) イベントのスポンサー企業のロゴ。この分野で積極的に活動している企業が判る。(右下) 展示会の最前列を占める企業。

第3章 AR/VR/MR のキーデバイス（ディスプレイ）

図 3-1 は、VR/AR 用ディスプレイ技術に関するさまざまなタイプを解説している。LCD (LTPS)、LCOS (Liquid Crystal on Silicon)、DLP (Digital Light Processing)、Micro OLED、Micro LED といった技術が紹介されている。

LCD (LTPS) は、薄膜トランジスタ (TFT) を利用したディスプレイで、高解像度と高速な応答時間が特徴である。LCOS は、シリコン上に液晶を配置し、高解像度の画像を反射式で生成する。DLP は、デジタルミラーデバイス (DMD) を使用したプロジェクション技術で、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いている。

Micro OLED は、高解像度でコンパクトなディスプレイを提供し、OLED エミッターとカラーフィルター、または直接パターニング技術を使用している。Micro LED は、小さな LED をアレイ状に配置し、単一のモノリシックなディスプレイとして機能する。

これらの技術はそれぞれ、VR や AR といった没入型体験を提供するための異なるアプローチをとっており、各々が独自の強みと応用分野を持っている



図 3-1 AR/VR 機器に搭載されるマイクロディスプレイ

HoloLens（光学パススルー方式）における狭い FoV と仮想オブジェクトのすり抜けた半透明な画像と比較すると Varjo 社の仮想オブジェクトの広い FoV とリアルな印象は圧倒的な有意差を示している。

① Meta 社の動き II（開発アイテム）

上述のビデオパススルー方式の場合、外界とのインターフェースとして、目の動きを投影しかつ視線を自然に投影することが肝要であると考えられている。メタ社はその機構を有するプロトタイプを作成し実験を重ねている。目の画像投影には、マイクロレンズアレイを用いたライトフィールドディスプレイ方式のイメージングを採用している。

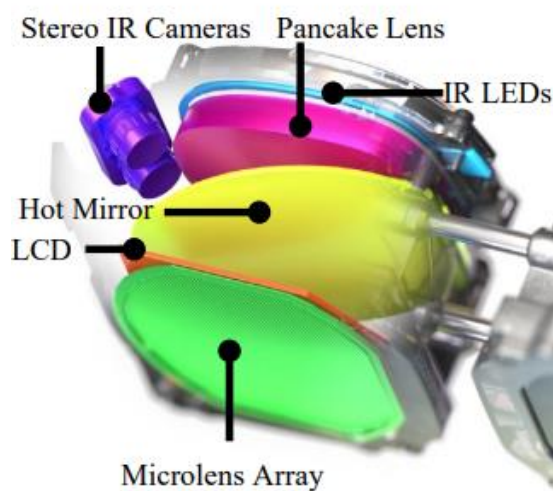


図 4-21 リバースパススループロトタイプの概要

（出典：Reverse Pass-Through VR

SIGGRAPH '21 Emerging Technologies , August 9–13, 2021, Virtual Event, USA)

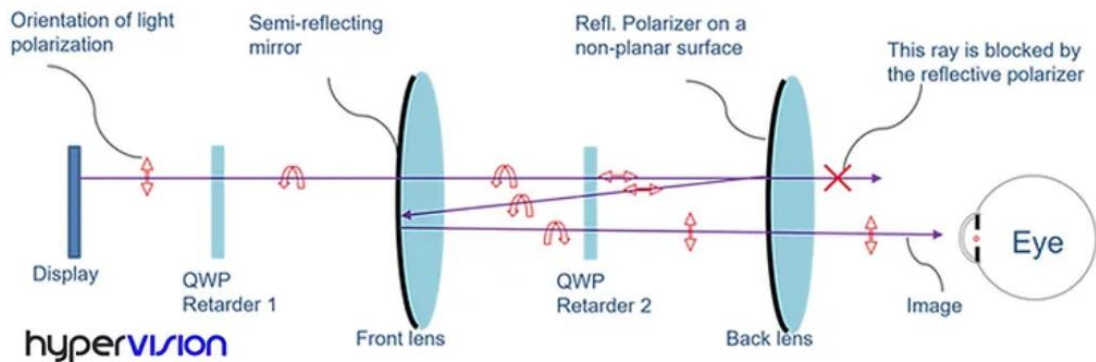


図 4-23 パンケーキレンズにおける光学要素の配置図

(出典：<https://www.hypervision.ai/apple-vp-optics-insights>)

Hypervision 社の解析では、Facebook（現 Meta 社）出願特許記載にその内容が記載されているとの事である。すなわち、右下図（特許中 Fig 4C と記載）の QWP(140)は、平坦な薄膜が対向するレンズ表面(404 と 416)の間に円筒状に巻かれるように埋め込まれている。この構造により QWP フィルムが変形することなく直線偏光から円偏光への変換特性を維持することができると説明できる。

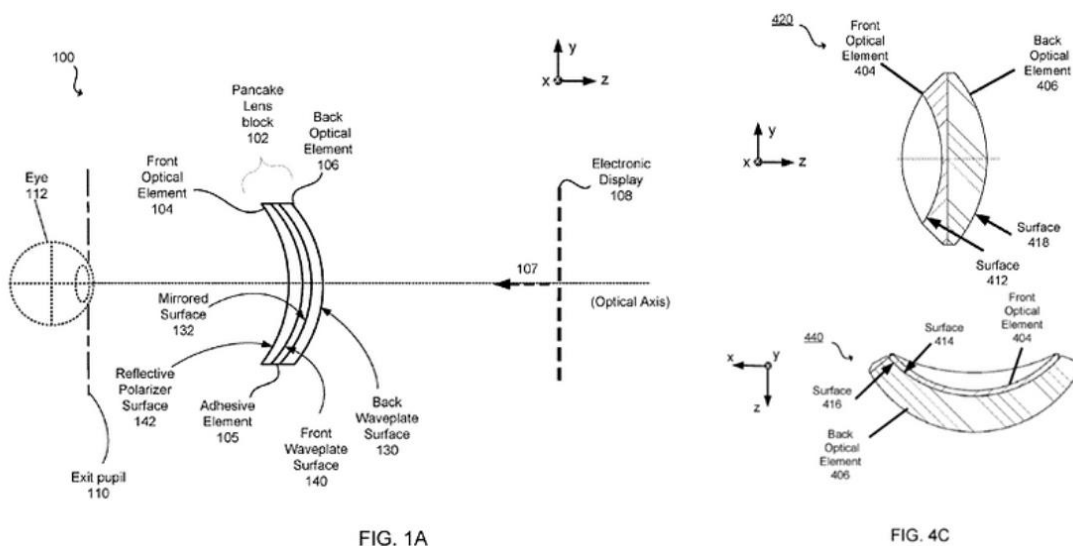


FIG. 1A

FIG. 4C

図 4-24 FACEBOOK (META) の特許記載；US20180120579A1

(出典：図 4-23 に同じ)

4-2-3. 波動光学系

上述のとおり、Meta 社は開発中の案件を積極的にオープンにし、関連プレイヤーの参加を促して開発スピードの加速を狙っている。その中で昨年新たな光学系の提案がなされている。

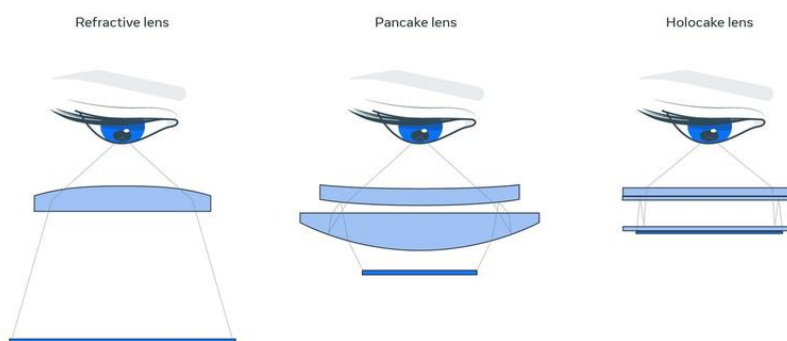


図 4-29 VR 光学系の変化

(出典：

https://www.watch.impress.co.jp/img/ipw/docs/1418/029/html/metavr10003_o.jpg.html
1)

2022 年 6 月に公開された情報によると、新しいコンセプト；「Holocake lens」により、これまでにないボディーの薄さを実現することが可能との事である。技術的に不明な点もあるが、従来のようにレンズを通してディスプレイからの光を眼に届けるのではなく、“ホロケーキレンズ”を通して眼に届くというプロセスの様で、偏光反射を利用してディスプレイと眼の距離を大きく軽減することが技術のミソである。

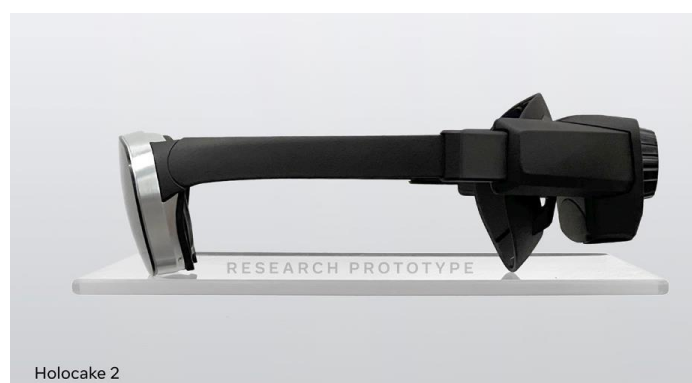


図 4-30 薄型化と軽量化を実現した「Holocake 2」

(出典：アイティメディア（株）運営サイトより

https://www.itmedia.co.jp/pcuser/articles/2206/21/news087_2.html)

Surface Relief Grating (SRG) には、回折光を誘導する Slant 形状の in-coupler が形成される。他方、目の位置に回折光から実像として光を取り出す out-coupler には、in-coupler 同様 slant 矩形パターンが形成される。但し、但し、eye-box を確保するために、矩形パターンの形状には、導光板長軸方向に一定のグラデーションが施されることとなる。

Photo Polymer Grating (PPG) でも同じく in-coupler に回折光が形成されるが、holography パターン由来の回折光となる。さらには、out-coupler では、SRG における同様に光の回折効率（吸収効率）を変化することにより、広い eye-box を確保することができる。

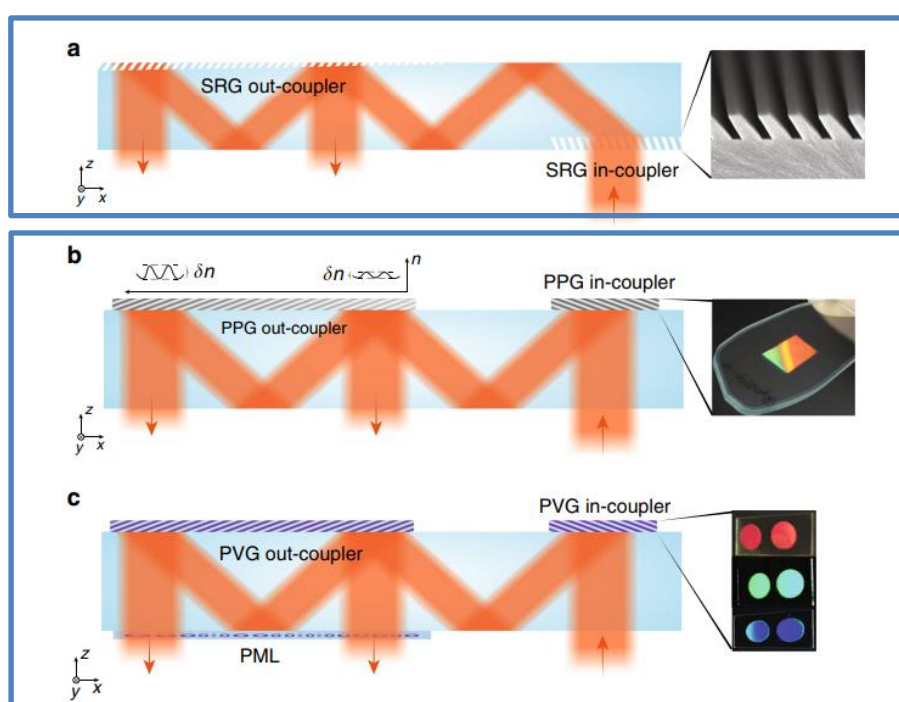


図 4-49 回折タイプ導光板の動作原理

(a) SRG : Surface Relief Grating、(b) PPG : Photo Polymer Grating、(c) PVG : Polarization Volume Grating

(出典 : Science & Applications (2021)10:216, www.nature.com/lisa)

最後に Polarization Volume Grating (PVG) を導入する場合がある。この場合は PVG を透過型で構成し難いようである。更に、光の出射面に配置する液晶偏光の制御が非常に難しいという欠点もある。

回折タイプの導光板光学系周辺材料として使われる例を DELO 社はいくつか紹介している。まず、光学系の肝となる上記の in-coupler や out-coupler には、製造コストを鑑み高屈折率樹脂が想定される。しかし、導光板基板との屈折率のバランスの観点から、これら coupler の屈折率は、1.8~2.0 程度は必要であると捉えている。現状この目標に対して、樹脂単体での屈折率目標達成は難しいので、無機透明フィラーの添加が必須ということになっている。

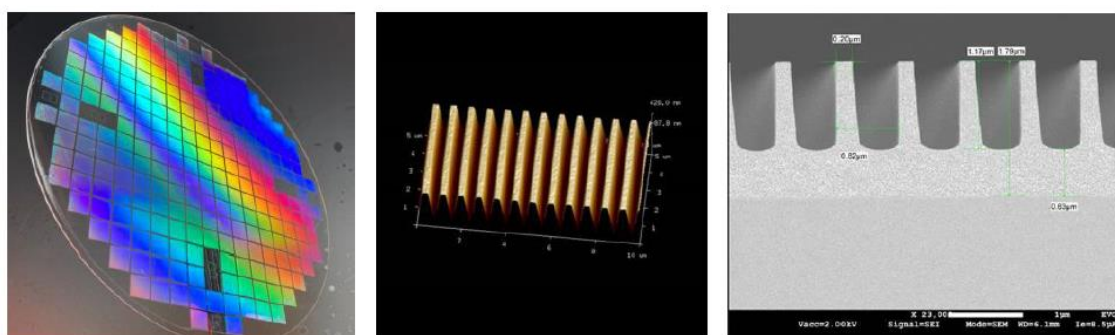


図 4-60 200mm ガラスウェハー上にインプリント形成された高屈折率ポリマーを使ったハイアスペクト比の矩形パターン。

(出典：Proc. of SPIE Vol. 11931, 2023/2/2)

また、上記導光板と周辺部位の屈折率ギャップは、その導光板内の光量確保（漏れ光の低減）から大きくすることが望まれ、結果的に空気との界面を形成することとなる。したがって、周辺部の空気層を正確に保持するために、その上層のカバーガラスとのギャップを確保することが必須となり相当するボンディング部材が使用される。

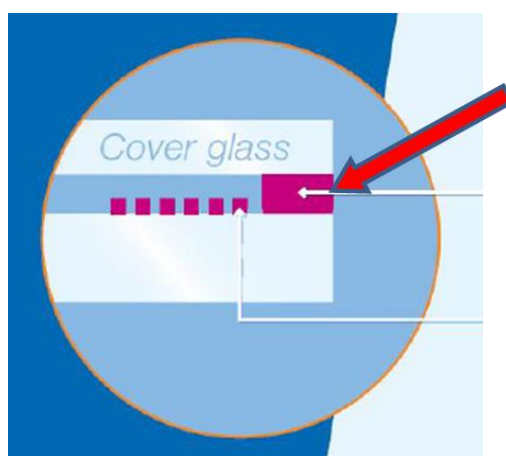


図 4-61 AR ヘッドセットの導光板/カバーガラス間のギャップ補償

(出典：図 4-60 に同じ)

また、ホログラフィックフィルムをフロントガラス面に配置することにより、同じく HUD 小型化と FOV の拡大を展開できるとして各所で展開が図られている。

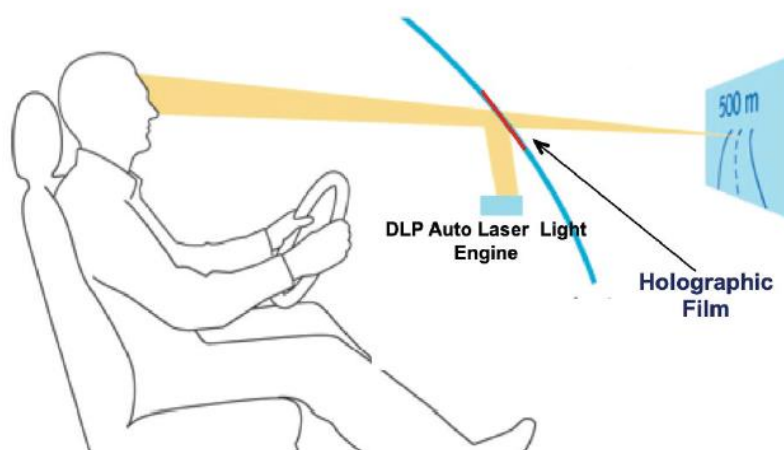


図 5-8 ホログラフィックフィルムベースの AR HUD

(出典：Texas Instruments HP より)

https://www.ti.com/lit/wp/dlpy009/dlpy009.pdf?ts=1659158910062&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)

先に述べた Waveguide(導光板)の in-coupler や out-coupler で使用したホログラムフィルムとここで示す“厚い”ホログラム；ホログラムレンズは機能が違う。前記の“薄い”ホログラムについては、波長選択性が少なく白色光の回折光により色づいて見える。他方、ここで取り扱う“厚い”ホログラムは特定の波長に鋭敏に回折効率が高くなるため、白色光はほぼ透過して透けて見えることになる。したがって、特定波長を回折させてレンズとしての機能を持たせることが可能になる。

第6章 XR 機器のセンサー

6-1. XR 機器は最新の技術でできている

XR 機器は製品として本当に量産化が進み、スマホのように誰もが使うようになるのか？という疑問を多くの人が抱いていると思われる。XR 酔いの全く感じられないごく自然な XR 空間を体験できる装置こそが誰もが欲している XR 機器だが、そのような装置の量産化はまだ実現していない。理想の XR 機器は最新の技術から構成されるためである。

表 6-1 XR で必要とされる技術と、その技術を利用する他の装置例

ハードウェア・ソフトウェア	内容	XR 機器以外の用途例
高性能 LiDAR	空間認識(奥行き)、距離の測定	自動運転、ドローン
フラッシュライダー	顔認識、3D マッピング	スマートフォン
カメラ	空間認識、ジェスチャー入力	スマートフォン
赤外線カメラ	視線検知、ジェスチャー入力	スマートフォン
ウェアラブルデバイス(生体センサー)	心拍数、血圧、活動レベル測定など	スマートウォッチ
低消費電力の半導体	コンピューターの消費電力低減が必要な箇所全般(AVP に関してはバッテリーの持続時間に対する課題の克服や、ロス電流による発熱抑制のため)	データセンター(大容量化の更なる要求)、サービスロボット※注等
バッテリー	長時間駆動、バッテリーの小型軽量化	サービスロボット、電気自動車
センサーフュージョン	複数のセンサーから得た情報を統合し、自動で目的に応じた情報処理を行う。AI を用いたエッジコンピューティング等によりフュージョン時のデータ処理量低減の技術開発も進められている。	自動運転、製造の DX 化
画像処理	AI などによる画像認識・画像処理	自動運転、ドローン、各種検査装置
情報通信	大容量のデータ伝送	5G、6G 通信

(※注：バッテリーの長時間駆動実現のために、電力消費の縮小が求められる)

表 6-1 に挙げた XR 機器以外の用途例の赤の太字部分は、まだ実用化・量産化の観点では発展途上の技術だが、自動運転や 5G・6G 通信など開発競争の激しい分野との接点が多



図 6-6 HOT-2000 センサー部イメージ図及び脳活動計測原理図(上段)

脳活動計測装置「HOT-2000-XR」(下段左側 3 枚)

視線追跡機能一体型 XR ヘッドセット「Varjo XR-3」の装着イメージ(下段右側)

(出典：MeetXR 2023 関西 配布資料)



図 6-7 Varjo XR-3

(出典：<https://varjo.com/products/xr-3/>)

6-5. 2023 年ノーベル化学賞「量子ドット」を用いたセンサー

2023 年のノーベル化学賞は、「量子ドットの発見と合成」に対して贈られた。

量子ドットは、II-VI 族、III-V 族、IV-VI 族の元素グループによって構成され、ナノクリスタルと呼ばれることもある。同じ物質の量子サイズを変更するだけで、発光波長(吸収波長)を変更できるため、ディスプレイのみならず様々な分野で注目されており、近赤外イメージセンサーにも応用できるという。

Quantum Solutions社 独自の特長

PbS量子ドット

- 1 幅広い吸収/発光ピーク (700~2000nm)
- 2 独自技術による吸収/発光ピークの制御(最大±5nm)
- 3 狭いFWHM (< 100~120nm)

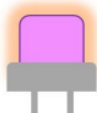
ペロブスカイト量子ドット

- 1 広域吸収 (X線から) および波長可変発光 (410~685nm)
- 2 高いPLQY (最大100%)
- 3 全ての量子ドットにおいて最も狭いFWHM (< 20~25nm)

PbS量子ドット



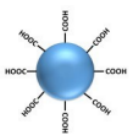
近赤外光検出器
顔認識、自律走行車、AR・VR用途に最適



近赤外 QD LEDs
900-2000nmの幅広い範囲の近赤外LED用の効率的な活性材料



太陽電池
シリコンベースの太陽電池パネルの効率向上



バイオメディカルイメージング
近赤外イメージングによってがんや他種の検出が可能

ペロブスカイト量子ドット



QD LCD ディスプレイ
HDRディスプレイの色域を拡張



UVセンサー
シリコンベースの光検出器のUV感度を向上



QD LEDs
最も広い色域と最高のコントラストを持つディスプレイに最適



X線シンチレーション
X線検出用の高効率シンチレータ材料

図 6-34 Quantum Solutions 社独自の特徴(上)とアプリケーションガイド(アプリケーション例)

(出典: https://filgen.jp/Product/Bioscience4/Quantum_Solutions/QuantumSolutions-Catalogue.pdf.pdf)