顯示與光學 II：光學架構

W7 ｜ 混合實境技術與應用（EE6122）

AR 波導 · VR Pancake · 計量與案例

今天要回答的問題

微顯示器的影像，怎麼「送到眼前」？

一、AR 合光與波導

把虛擬影像疊到真實世界上

AR 合光技術三種路線

分光器式

半反鏡合光；結構簡單、體積大

自由曲面式

曲面反射；影像好、較厚重

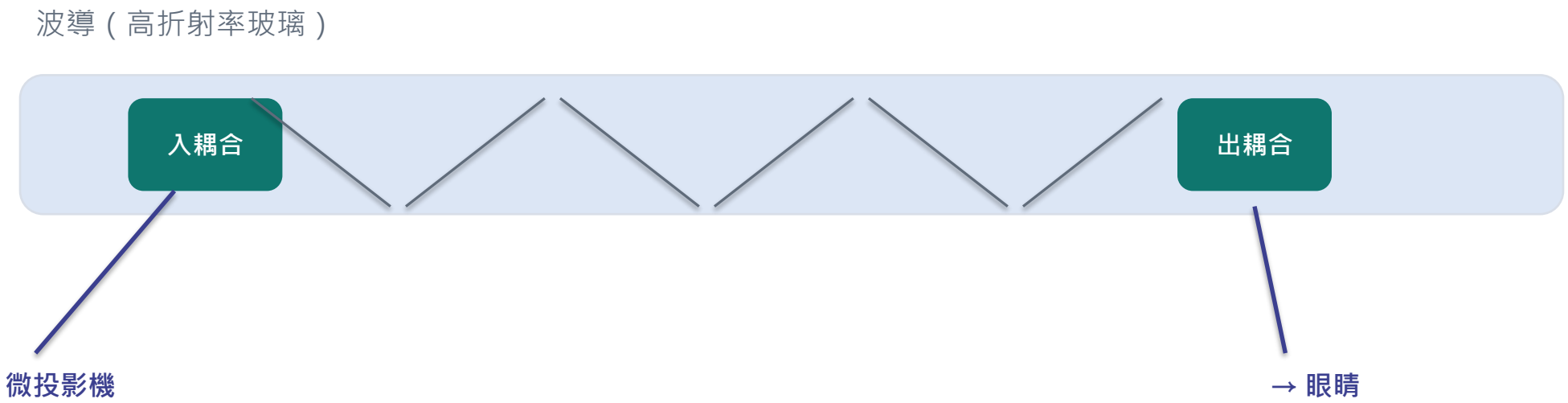
波導式

輕薄、量產主流；本週重點

輕薄眼鏡型 AR 的關鍵：光學波導（Waveguide）。

波導原理

全內反射（TIR）+ 光柵耦合



入耦合光柵把光導入波導 → 光在玻璃內全內反射（TIR）傳播 → 出耦合光柵把光導向眼睛。

為什麼需要「出瞳擴展」EPE？

眼盒 Eyebox 要夠大，眼睛才不會一動就看不到

微投影機的出光瞳孔很小；直接成像，眼盒會很小，眼睛一移動影像就消失。

- 出瞳擴展（Exit Pupil Expansion, EPE）：把細小光束在波導內「拉寬」成大片光。
- **→ 眼盒變大、配戴容忍度提高。**

1D vs 2D 出瞳擴展

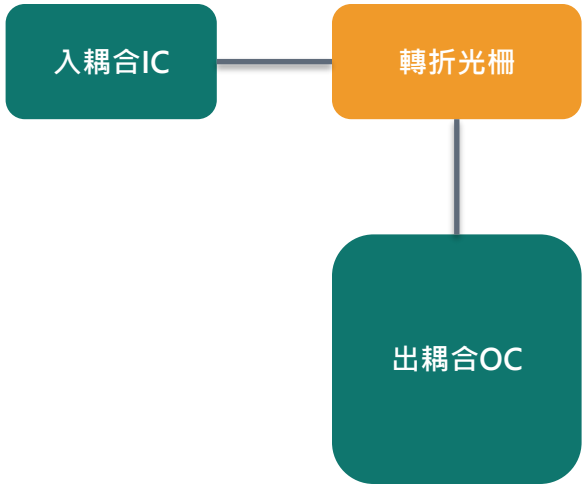
2D EPE 多一個「轉折光柵」，光機可做很小

1D EPE（兩區域）



光機出瞳在非擴展方向要做大 → 投影模組長條、鏡腳厚重；也難兼顧大視場與均勻度。

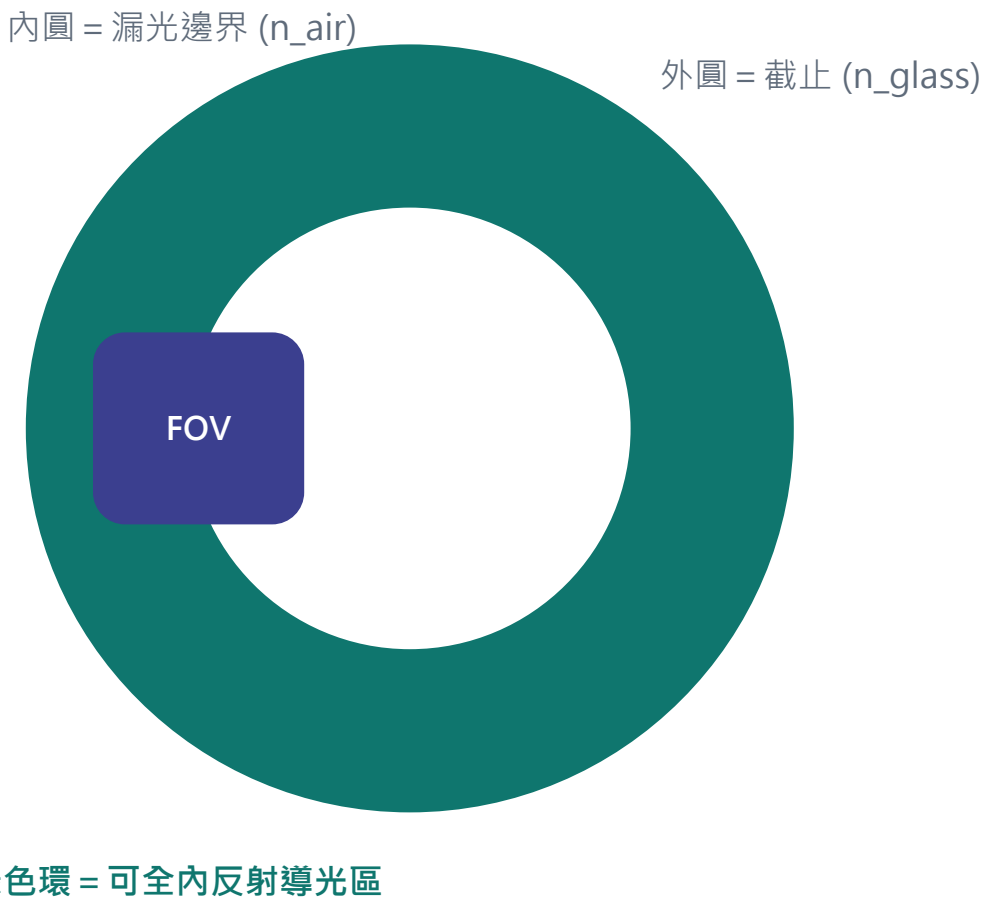
2D EPE（三區域）



轉折光柵先橫向擴展 → 出耦合再縱向擴展並導出。光機出瞳可小到 2–3 mm，鏡框大幅縮小（代價：光效下降）。

K 空間：為何高折射率玻璃能撐大 FOV

導光只發生在「環形區」內



綠色環 = 可全內反射導光區

只有落在內外圓之間「環形區」的光才能在波導內全內反射傳播。

- 影像的 FOV 是一塊矩形，必須完整塞進這個環裡。
- **玻璃折射率越高 → 外圓越大 → 環越寬 → 能容納的 FOV 越大。**
- 這就是為何業界追求 n=1.9~2.0 的超高折射率玻璃。

偏振管理（進階）

光柵繞射效率高度依賴入射光偏振態（TE/TM）。

- 轉折光柵常改變偏振 → 若設計不當，畫面一側亮、一側暗（亮度不均）。
- 先進波導用液晶聚合物做「梯度效率」補償傳輸損耗，改善均勻度。

二、VR Pancake 光學

把 VR 頭盔做薄的關鍵

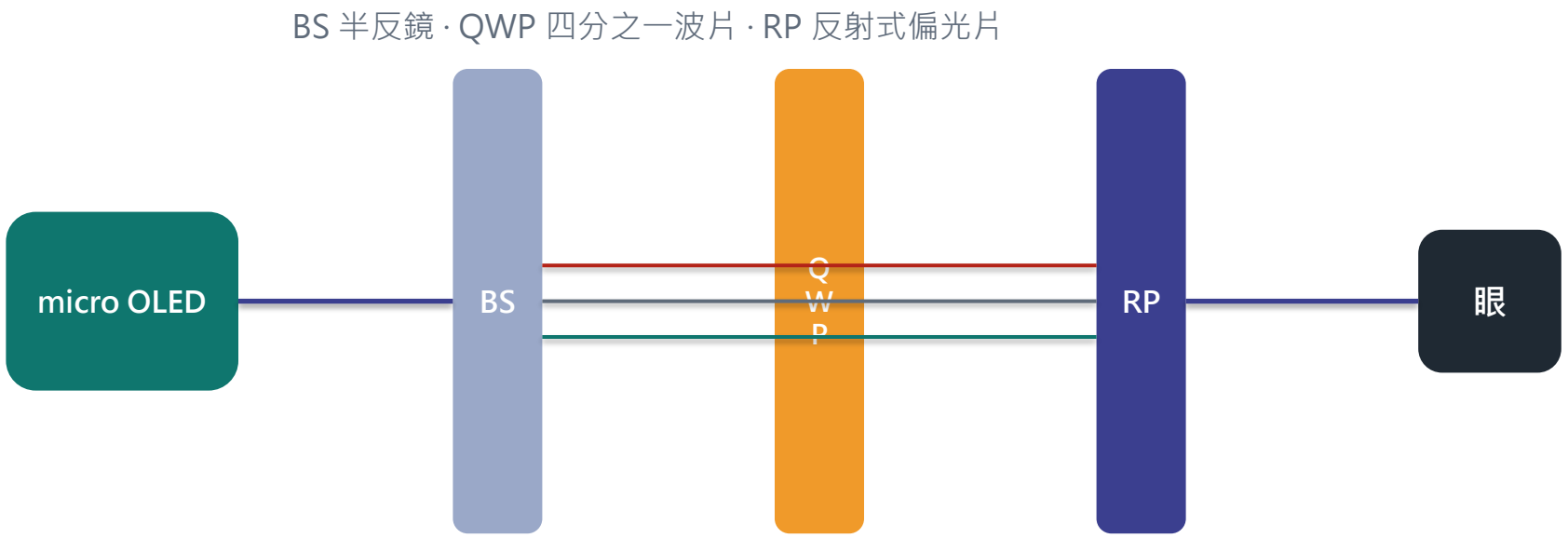
從 Fresnel 到 Pancake

傳統 VR 用 Fresnel 透鏡：便宜，但體積大、邊緣畫質差。

- **Pancake（餅乾透鏡）用「偏振折疊」把光路折三次 → 厚度僅約焦距 1/3。**
- **代價：光效低（理論上限 25%，實際常 < 10%）→ 需高亮度 micro OLED。**

Pancake 偏振折疊光路

光在鏡片內往返三次 → 厚度 1/3



線偏振 → QWP 轉圓偏振 → RP 反射（折疊）→ 再過 QWP 變正交線偏振 → BS 反射 → 第三次過 QWP → 此時 RP 對它透明 → 出射進眼。

Pancake 的代價：效率與鬼影

光兩次經過 50/50 半反鏡 → 理論效率上限 0.5×0.5 = 25%，實際常 < 10%。

- 所以 Pancake 必須搭配數千 nits 的高亮 micro OLED（LCD 撐不起來）。
- **鬼影 Ghosting：QWP 相位隨波長漂移、偏振轉換不乾淨 → 需寬頻帶延遲膜。**

展望：Holocake 與幾何相位透鏡

Holocake：用全像光學元件（HOE）取代厚玻璃 → 更薄；但色散大，需窄頻雷射光源。

- 幾何相位透鏡（GPL/PB Lens）：靠液晶排列方向調相位的平面元件。
- **偏振相依焦距 → 可做電子變焦（Varifocal），動態解 VAC，且無機械移動。**

三、計量與系統案例

怎麼「量」，以及集大成的 Apple Vision Pro

解析度 ≠ 清晰度 → MTF

MTF（調制轉換函數）：光學系統對不同空間頻率（黑白條紋密度）的對比還原能力。
- 4K 螢幕若配劣質透鏡，邊緣 MTF 急降 → 中心清晰、邊緣模糊。
- **Pancake 的優勢之一：全視場 MTF 較均勻。**

[圖] 典型 MTF 曲線（對比 vs 空間頻率）

計量標準與量測

輻射度學（Watts，安全性）vs 光度學（Nits，人眼感知）vs 色度學（CIE u'v'）。
- 波導色散 → 視場邊緣色偏（Color Shift），用光譜儀量 Δu'v' 均勻度。
- 產業標準：IEC 63145（穿戴顯示器）、IDMS（含 PPD 量測規範）。

系統案例：Apple Vision Pro

三片式 Pancake：QWP 與偏振膜層壓在曲面透鏡上 → 大角度入射漏光/鬼影改善。

- 視訊透視 VST：R1 晶片達 <12ms 光子到光子延遲。
- EyeSight：外部柱狀透鏡 OLED，讓旁人看到使用者的眼睛（解 VR 社交隔閡）。
- **顯示源（micro OLED）+ 光學（Pancake）+ 計量，三者集大成。**

本週結論

AR 靠波導 + 2D 出瞳擴展做輕薄；K 空間解釋 FOV 受折射率限制。
- VR 靠 Pancake 偏振折疊做薄，代價是低光效（需高亮 micro OLED）。
- **用 MTF 與 IEC/IDMS 標準客觀量測；Apple Vision Pro 是集大成案例。**