CPO 矽光子測試程序解讀

APC 四段 Insertion 測試矩陣全解：從晶圓、bar、die 到封裝，每一站量什麼、怎麼從研發收斂到量產

報告日期：2026-10-21（2026-10-22 依原文全文逐段重讀修訂：補齊 12 張 Summary Comparison 中文全表、各程序機台與儀器配置、原文瑕疵逐條查證）

解讀對象：Advanced Photonics Coalition（APC，先進光子聯盟）Test & Measurement 工作組《Silicon Photonics for Co-Packaged Optics — Recommended Test Procedures》Version 1.0（© 2026；PDF 建立日 2026-10-09；全文 129 頁，含 47 張測試系統配置圖、Table 1 測試矩陣與 Table 2—13 共 12 張 Summary Comparison 摘要比較表）。

對照資料：野村（2026-07-24）、摩根士丹利（2026-10-08）、瑞銀（2026-10-08）、永豐（2026-09-16、2026-09-21 專家會）、群益 ECOC 2026 會後分享（2026-10-06）對 CPO 測試 insertion 的描述。

讀法說明：標 文件事實 者照 APC 原文；標 解讀 者為本報告依原文內容推斷；標 推論 者為投資推論。凡標「一般常識」的數字（如光纖尺寸、矽波導厚度）不是 APC 文件數字，僅供建立尺度感。本報告為研究整理，不構成投資建議，亦不提供買賣建議或目標價。

目錄

0 一頁重點
1 讀前須知：名詞白話表
2 前言與編輯群：誰寫了這份文件
3 第 1 章 Introduction：Table 1 測試矩陣
4 Insertion #1 晶圓級（2.1、2.2）
5 Insertion #2 晶圓級 E-PIC（3.1、3.2、3.3）
6 Insertion #3 bar 級（4.1、4.2、4.3）
7 Insertion #3 die 級（5.1、5.2、5.3）
8 Insertion #4 封裝級（6.1）
9 附錄：測試設備與參考供應商（7.1、7.2、7.3）
10 跨章節觀察
11 與券商 insertion 口徑的差異
12 投資意涵（推論）
13 驗證清單、反證條件與信心水準
A 原文瑕疵逐條查證（全文重讀）
14 出處

0　一頁重點

六個結論（整體信心：中；文件事實高、投資推論中）

1. **這是 CPO 測試的第一份產業共同「流程骨架」，不是規格書。**APC 把矽光子 CPO 的測試拆成 4 個 ATE insertion（自動測試設備上機站點）：#1 晶圓（EIC、PIC 各自測）→ #2 晶圓（光電整合 E-PIC，中間隔一道後段製程）→ #3 bar 或 die（切割後、封裝前）→ #4 封裝件（出貨前最後一關）。每站再依訊號方向（電進電出、光進光出、光進電出、電進光出）與成熟階段（R&D、Validation、低量產 LVM、高量產 HVM）各寫一套程序。**全文沒有任何 pass/fail 數值門檻**，元件別配置與判定準則留待後續版本。
2. **台廠旺矽（6223）站在規則制定位置。**工作組主席是 MPI（旺矽）的 Lawrence van der Vegt，共同主席是 Teradyne 旗下 Quantifi Photonics 的 Kees Propstra。附錄裡 MPI 是唯一同時列名晶圓 / bar / die 探針台（電、光、環境三類）、DC 探針、RF 探針的廠商。但這是「產品類別被列為參考」，**不等於訂單或客戶認證**。
3. **從 R&D 到 HVM，測試項目大幅收斂。**HVM 線上 100% 只留「功率 / 損耗、波長、消光比、暗電流、增益」這類秒級可量的直流或準直流參數；高速（TDECQ、調變頻寬、眼圖）、全光譜（WDL、PDL、完整 L-I、SMSR）、環境（溫度、濕度、可靠度）一律退到抽樣。文件把 LVM 的主要產能槓桿明寫為「auto-align（自動對光）速度與減少波長點數」。
4. **每一站都要跟上一站比「同一顆 die」的差值（Δ）。**#2 對 #1、#3 對 #2、#4 對 #3，Validation 階段把 Δ 正式化成相關模型，目標是用前一站資料預測、縮小後一站的測試範圍。前提是 die 級追溯從 R&D 就要建好，測試資料系統本身變成流程的一部分。
5. **#3 分成 bar 與 die 兩條路，選哪條由光 I/O 方式決定。**邊緣耦合元件要先劈裂出端面、鍍 AR/HR 膜，所以走 bar 級（抓鍍膜反射率、burn-in 後雷射閾值偏移、通道均勻性）；光柵 / 表面耦合元件不需要端面，晶圓直接切成 die（抓崩邊、貼附傾斜、切割應力、PD 邊緣漏電）。
6. **APC 的編號和券商口徑不同，讀數字前要先對齊。**APC 的 #2 沒寫 hybrid bonding、沒寫「雙面探測」；#4 是「封裝好的 E-PIC 模組」，物理對象較接近野村口徑的 3.5（光引擎封裝級），而不是券商口徑中 ASIC＋光引擎的 CPO 系統級測試。

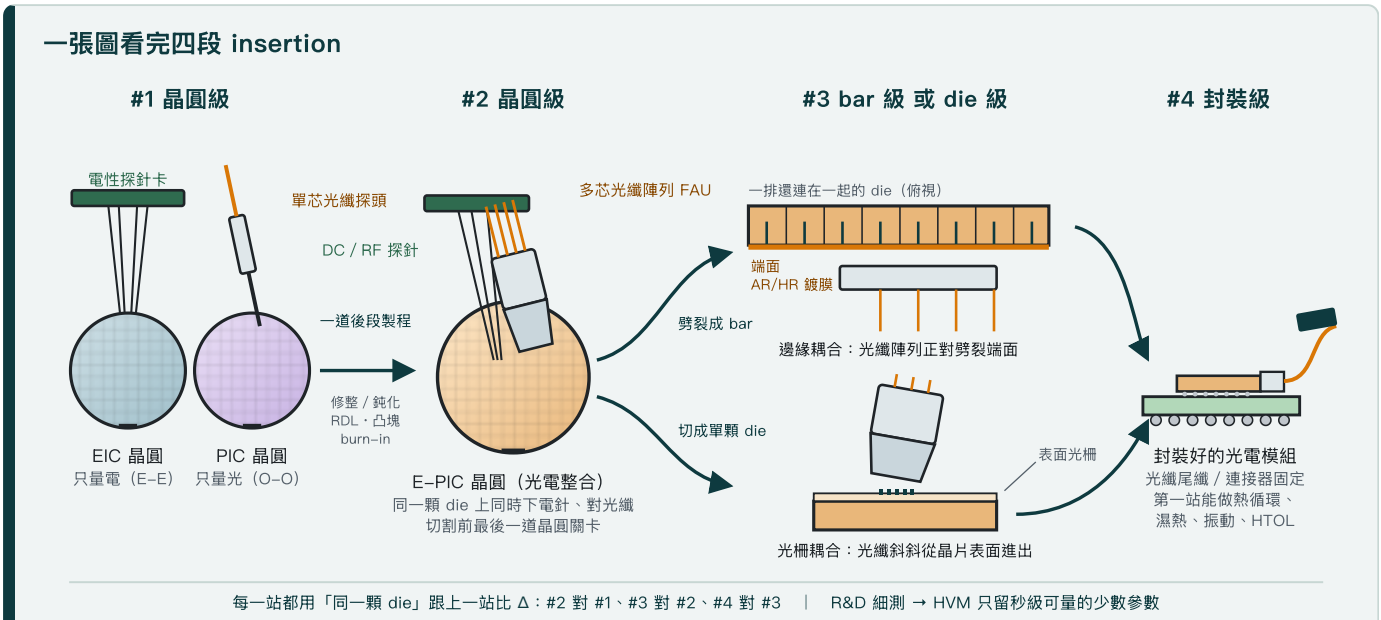


圖 1　四段 insertion 的實物旅程（本報告自繪）。#1 時 EIC（電晶片）與 PIC（光晶片）各在自己的晶圓上測；中間經一道會影響光學性能的後段製程（修整、鈍化、RDL / 凸塊、burn-in）後，#2 在同一片 E-PIC 晶圓上同時下電性探針與光纖陣列；切割後依光 I/O 方式分成 bar 級（邊緣耦合，光纖陣列正對劈裂端面）或 die 級（光柵耦合，光纖斜照晶片表面）；#4 測封裝好、光纖已固定的模組。依據：APC CPO 測試程序第 1–6 章，2026-10-09。

1　讀前須知：名詞白話表

APC 文件幾乎每段都是縮寫。下表把本報告會用到的名詞講白，並給一個尺度感。文件事實 欄位的定義照 APC 用法；典型數值除非特別標明，屬一般技術常識，不是 APC 規定。

名詞	白話說明	尺度感 / 單位
EIC / PIC / E-PIC	EIC 是純電晶片（雷射驅動器、TIA、控制電路）；PIC 是光子晶片，在矽上做波導、調變器、光偵測器；E-PIC 是兩者整合後的光電晶片（單晶整合或堆疊）。	CPO 光引擎的核心；APC 從 #2 起只談 E-PIC
ATE insertion	產品在流程中被送上自動測試設備（ATE）測一次，就叫一個 insertion。「#2」就是第二次上機。	APC 定 4 站（#1–#4），另留未編號的「成品」
E-E / O-O / O-E / E-O	訊號方向：電進電出（純電 EIC）、光進光出（波導、調變器、光開關）、光進電出（接收端：光偵測器 PD 或 PD＋TIA）、電進光出（發射端：雷射＋調變器）。	決定要配光源還是電源、量光還是量電
插入損耗 IL	光走過元件或耦合介面損失多少。	dB；3 dB＝只剩一半，10 dB＝剩 1/10
WDL / PDL	WDL：IL 隨波長怎麼變；PDL：不同偏振方向的光 IL 差多少（光柵耦合器對偏振特別敏感）。	dB；APC 舉例掃 O-band 1260–1360 nm、C-band 1530–1565 nm
回損 RL	被介面反射回去的光有多少；反射太大會干擾雷射。bar 級用它量端面鍍膜的反射率。	dB，數字越大反射越少
消光比 ER / OMA	調變器「亮」與「暗」兩態的功率比（ER），以及兩態功率差（OMA）。越大，接收端越好分辨 0 與 1。	ER 以 dB；OMA 以 mW 或 dBm
V_π / $V_\pi L$	讓 MZ 調變器相位轉半圈（180°）所需電壓；$V_\pi L$ 是乘上臂長的效率指標。越低越省驅動功率。	V；V·cm
響應度（responsivity）	光偵測器每吸收 1 瓦光，產生多少安培電流。	A/W；鍺 PD 在 1310 nm 約 0.8–1 A/W（一般常識）

暗電流	完全沒光時 PD 自己漏的電流，是雜訊來源；切割傷到 PD 接面邊緣時會變大。	通常 nA 量級
TIA / 靈敏度 / 過載	TIA 把 PD 的微弱電流轉成電壓；靈敏度是達到目標誤碼率所需的最低光功率；過載是光太強讓接收器飽和的門檻。	靈敏度、過載以 dBm
L–I 曲線 / 閾值電流 Ith / 斜率效率	雷射輸出光功率對驅動電流的曲線。電流超過閾值才開始雷射；直線段斜率就是斜率效率。burn–in 後閾值往上飄＝早期劣化。	mA；W/A
SMSR / RIN / chirp	SMSR：主波長比旁邊雜模強多少；RIN：雷射輸出強度的隨機抖動；chirp：調變時波長跟著抖。	dB；dB/Hz；GHz
PAM4 / TDECQ	PAM4 用 4 個亮度等級，每個符號傳 2 bit；TDECQ 衡量 PAM4 發射端眼圖品質，表示比理想發射器多付出多少 dB 代價，越小越好。	dB
S21 / S11	高頻網路參數：S21 是傳輸（用來看頻寬），S11 是輸入端反射（看阻抗匹配；封裝寄生會讓它變差）。	dB 對頻率
光柵耦合 vs 邊緣耦合	光柵耦合：在晶片表面刻週期溝槽，讓斜斜照下來的光纖光折進波導，晶圓上就能測；邊緣耦合：光從劈裂出來的端面水平進出，寬頻、損耗低，但必須切開後才測得到。詳見圖 5。	光柵：光纖斜約 8–10°（一般常識）
bar vs die	bar 是晶圓劈裂出來、還連成一排的多顆 die（一條「棒」）；die 是切成單顆的晶片。	bar 讓整排端面一次鍍膜、一次測
FAU	光纖陣列單元：多根光纖以固定間距（pitch）排在 V 形槽裡，一次對準多個光通道，是光學探針的「針」。	常見 pitch 127 或 250 μm（一般常識）
OLS / OPM / OSA / OFDR / λ meter / BERT / SMU	可調光源（雷射）/ 光功率計 / 光譜分析儀 / 光頻域反射儀（沿光路找反射點）/ 波長計 / 誤碼率測試儀 / 直流源表。	測試站的儀器組，見圖 22
CTQ / guard band / Cpk / Gauge R&R / SPC / PAT	CTQ：攸關品質、量產必測的關鍵參數；guard band：比規格再收緊的保護帶；Cpk：製程能力指數；Gauge R&R：量測系統本身的重複性與再現性；SPC：統計製程管制；PAT：以群體平均自動抓離群品。	品質管理通用工具
ORT / HTOL / burn–in	ORT：量產中持續抽樣做可靠度；HTOL：高溫通電壽命試驗；burn–in：通電加熱篩掉早夭品。	可靠度依 Telcordia GR–468、MIL–STD–883 等
MHU / ATE docking station / SECS/GEM	MHU：全文逐段查證，只出現在 bar / die 級 LVM、HVM 的圖說與小標（如「Automatic Probe System with MHU」），正文從未展開縮寫、也沒有任何描述；依圖為探針台旁的直立物料搬運塔，推測為 Material Handling Unit（本報告解讀）。ATE docking station：讓電性測試機的測試頭實體對接到探針台；同樣只出現在圖說與附錄 7.1.2，各節 Test Station 文字從未提到。SECS/GEM：設備與工廠 MES 系統溝通的標準協定（原文寫明為選配）。	bar / die 級量產才出現

2　前言與編輯群：誰寫了這份文件

文件事實 APC 是開放式產業聯盟，本文件由 Test & Measurement 工作組撰寫，屬第一版（Version 1.0），版權 © 2026 APC、保留所有權利；正文未標發布日（2026-10-09 為 PDF 建立日）。文件定位為「廣泛的 ATE 測試程序概覽」。

文件事實 **Limitations（限制聲明）**：文件以「現況（AS IS）」提供；出版者與貢獻者明示不負任何明示、默示或其他擔保，包括適銷性、不侵權、特定用途適用性與所有權；使用或實作本文件的全部風險由使用者承擔；出版者與任何貢獻者對任何一方的直接、間接、特殊、附帶或衍生損害（含利潤損失）一概不負責，即使已被告知可能發生；文件內容可能涉及第三方權利。解讀 這等於明說：它是流程建議，不是可據以驗收的規格，也不是專利授權。

角色	人員與公司
工作組協調兼編輯	APC：Melissa Kallos
Test & Measurement 主席兼編輯	**MPI Corporation（旺矽，6223）：Lawrence van der Vegt**
共同主席兼編輯	**Quantifi Photonics（Teradyne 旗下）：Kees Propstra**
其他編輯	Advantest：Shawn Kann、Vaishnavi Murthy；EXFO：Dominique Charron；ficonTEC：Rayhane Ghane；HPE：Jeff Maki；Santec：Jonathan Evans、Chris Heisler；Viavi：Ines Brunn（原文此行未標 Editor 頭銜）；另致謝前任共同主席 Raphel Dube Demers

文件事實 文件結構：前言（版權、Limitations、編輯群、成員表、目錄）→ 第 1 章 Introduction（Table 1）→ 第 2–6 章共 12 套程序（#1 兩套、#2 三套、#3 bar 三套、#3 die 三套、#4 一套），每套含各階段程序與一張 Summary Comparison（Table 2–13）→ 第 7 章附錄（測試基礎設施參考供應商）→ 封底。**原文目錄頁碼過時**：目錄寫 Insertion #4 在第 99 頁、6.1.4 Summary 在第 105 頁、附錄在第 120 頁，但正文實際 Insertion #4 從第 111 頁起、Summary（正文標 6.1.5）在第 119 頁，附錄在第 120–121 頁，封底第 122 頁；第 105–120 頁之間並無遺漏內容（PDF 共 129 頁，含前置 7 頁）。

文件事實 原文列出 64 家工作組成員，可大致分成：晶圓廠與 IDM（GlobalFoundries、Intel、IBM）、雲端與系統商（Microsoft、HPE、Ciena）、矽光子新創（Ayar Labs、Lightmatter、Xscape Photonics、OpenLight、Lightium）、測試與量測（Advantest、Teradyne、Keysight、EXFO、VIAVI、Santec、Quantifi、MPI、ficonTEC、NEXUSTEST）、光纖連接與被動元件（Fujikura、Furukawa、SENKO、TE Connectivity、Amphenol / CommScope、Panduit、Go!Foton、PHIX、Focuslight）、材料（Resonac、Dexerials、TOK、Qnity）、EDA（Synopsys、Siemens EDA、Ansys、Luceda、Flexcompute）等。

> **讀這份名單要注意的地方** 解讀
>
> 名單上**沒有** NVIDIA、台積電、Broadcom、Marvell、FormFactor、TEL、致茂。APC 是開放聯盟，名單反映的是「誰願意貢獻」，不代表 NVIDIA / 台積電 COUPE 等實際量產流程的做法，也不能據此推論名單外公司被排除在 CPO 測試供應鏈之外。

3　第 1 章 Introduction：Table 1 測試矩陣

3.1　Table 1：四個維度組成的矩陣

文件事實 下表重組自原文 Table 1「Test Procedures」。每一欄是一個「insertion × 形態 × 元件」組合，表身是各成熟階段的測試顆粒度。

ATE Insertion	#1	#1	#2	#3	#3	#4	（未編號）
形態	晶圓	晶圓	晶圓	bar	die	封裝件	成品
元件	EIC	PIC	E-PIC	E-PIC	E-PIC	E-PIC	Product
測試類別	物理、電、環境、功能	物理、光、環境、功能	物理、電、光、環境、功能	同左	同左	同左＋條件式	同左＋條件式
R&D	Granulate	Granulate	Granulate	Granulate	Granulate	—	—
Validation	Granulate	Granulate	Granulate	Granulate	Granulate	Granulate	—
LVM 低量產	Granulate	Granulate	Granulate	Granulate	Granulate	Granulate	Granulate
HVM 高量產	**Coarse**	**Coarse**	**Coarse**	**Coarse**	**Coarse**	**Coarse**	**Coarse**
本文件程序數	1（E-E）	1（O-O）	3（O-O、O-E、E-O）	3	3	1（整體）	後續版本

- **Insertion #1–#4**：#1 晶圓級（EIC、PIC 各自測）→ #2 晶圓級 E-PIC（中間隔一道後段製程，切割前最後一道晶圓關卡）→ #3 bar 或 die（切割後、封裝前）→ #4 封裝件（出貨前最後一關）。
- **成熟階段**：R&D → Validation → LVM → HVM；#4 只有 Validation / LVM / HVM 三段，沒有 R&D。
- **Granulate vs Coarse** 解讀：原文沒有下定義（2026-10-22 全文逐段重讀確認：兩字只出現在 Table 1，正文 2–7 章完全沒有再提）。依各節內容讀，Granulate 指逐項、細顆粒量測（全波長掃描、偏壓掃描、corner 矩陣、逐參數建分布）；Coarse 指只留少數 CTQ、單一條件、go/no-go 判定。表格的意思是：R&D 到 LVM 都還在逐項測，只有 HVM 收斂到粗篩。
- **後續版本**：將補 Physical、Functional、Conditional 三類參數群與 Finished Product（成品），並依 APC 其他工作組正在建立的 CPO 參考設計展開。

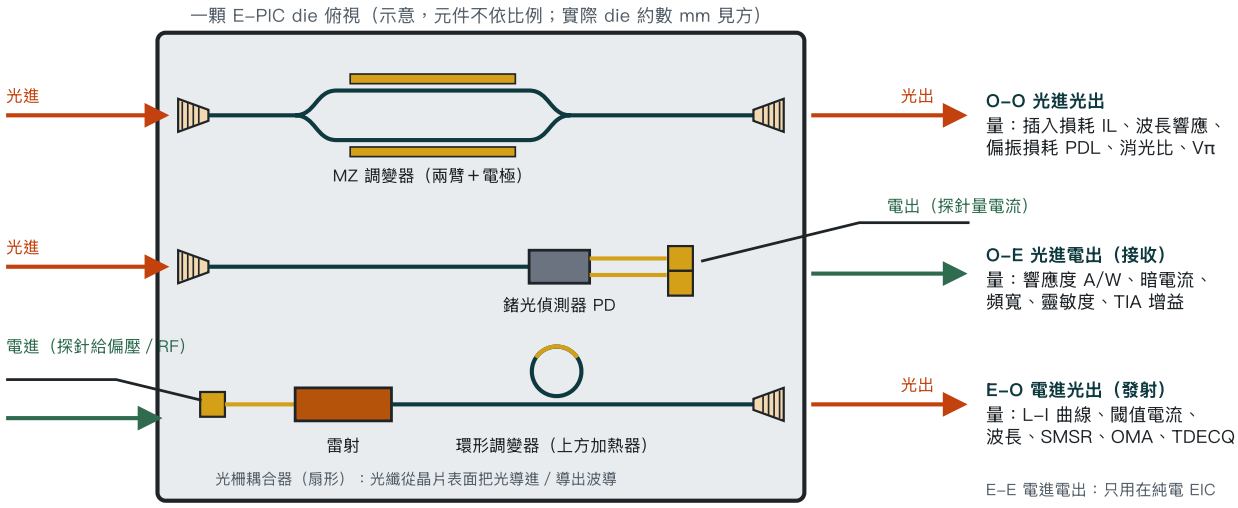


圖 2　四種訊號方向在一顆 E-PIC 上長什麼樣（本報告自繪，示意）。上排是光進光出（光柵耦合器→MZ 調變器→光柵耦合器），中排是光進電出（光→鍺光偵測器→焊墊，用探針量電流），下排是電進光出（探針給偏壓 / RF→雷射→環形調變器→光柵出光）。圖中紅色箭頭代表光的方向，實際上光是由上方的光纖斜照光柵進出。右欄是 APC 各方向 R&D 階段的代表量測項目。依據：APC CPO 測試程序第 1–3 章，2026-10-09。

3.2　文件刻意不規定什麼，以及三條貫穿規則

文件事實 探針與儀器配置取決於元件架構（MZ 調變器、環形調變器、EAM 電吸收調變器、SOA 光放大器、光開關陣列）、光 I/O 介面（光柵或邊緣耦合）、通道數與間距、電介面（DC、RF、毫米波、混合訊號），因此

文件**不規定單一機台配置**，只定義每一站需要的光探測、電探測、儀器「等級」；元件別的詳細配置與 pass/fail 準則留待後續版本。三條規則貫穿全文：

1. **IP 保護**：PDK（製程設計套件）與受測元件的設計、製程、效能資訊不得外洩，包括與外部夥伴、外包商、測試設備商分享的資料；測試程式、治具設計、相關性模型都要受控分發。
2. **軟體與資料處理是受控程序**：測試程式執行、即時擷取、後處理（曲線擬合、Δ / 相關性計算、SPC/Cpk）、資料庫儲存都算程序的一部分；嚴謹度從 R&D 的探索分析，升到 HVM 的即時 SPC 與自動分 bin。
3. **ECO 鏈追溯**：每筆測試紀錄都連到當時的測試程式、治具與製程 ECO（工程變更）版本，任何改變可往前追影響、任何效能飄移可往回追原因。

3.3 四個階段的共通範本

文件事實 每一節的四個階段都套同一套結構，差別在「量多細、抽多少、測多久」。整理如下：

面向	R&D	Validation	LVM 低量產	HVM 高量產
目的	完整表徵、找設計餘裕與失效機制，產生定規格用的資料	以正式規格驗證設計與製程能力	確認批間穩定，定出 HVM 測試內容與 guard band	以最短時間篩出不良
樣本	5–15 顆（die 位置 / bar）	30–90 顆，跨 ≥3 批	100% 測 CTQ；環境抽樣	100% 測最小 CTQ 集；環境只定期監控
機台	桌上型手動探針台	半自動或全自動	全自動＋晶圓 loader，選配 SECS/GEM 接 MES	全自動；bar / die 級為探針台＋MHU＋ATE 對接站
判定	不設 pass/fail	正式規格上下限、Cpk、Gauge R&R	規格加 guard band；SPC 失控即 hold	更緊的 guard band、自動分 bin、即時 SPC 自動停批
環境	全溫度掃描	規格溫度點 pass/fail	抽樣冷熱點檢	產線不做；季度或製程變更才抽樣
資料	保留全部原始曲線，逐參數建分布（晶圓級另畫空間分布）；資料用來推導下一階段規格	軟體控制儀器與配方，資料存檔做元件間交叉相關	另要求可追溯到 ECO 鏈	資料自動擷取，另用於製程監控
失效處置	—	失效要找根因並歸類（設計 / 製程 / 測試漏網…，類別隨站別增加，見 10.8）	SPC 失控→暫停並調查；異常升級為 Validation 式全測	超出 SPC（或晶圓圖、bar 圖、批趨勢）管制界限→停線或停批調查
測試時間	不優化：EIC 每顆數天、晶圓光學每顆數小時、bar / die 每顆數十分鐘到數小時	開始優化但覆蓋優先：EIC 每批數天到數週、晶圓每片數小時到一天、bar / die 每顆數十分鐘到一小時	主動優化：EIC 每顆數秒；光學每顆數秒到數分鐘	目標每顆秒級；環境與全光譜抽樣排在主產線節奏之外

樣本單位依形態不同：晶圓級 EIC 為 units、PIC / E-PIC 為 die 位置；bar 級 R&D / Validation 為 bar、LVM / HVM 為 die-on-bar（4.2 O-E 為 bar）；die 級為 die；封裝級為 modules。LVM 抽樣計畫原文舉例：EIC「每批 1 顆或每 N 顆（依 AQL / Cpk）」、晶圓光學「每批 1 片晶圓或每片 N 顆」、bar「每批 1 條或每條 N 顆」、die「每批 N 顆」、封裝「每批或每月 N 顆（依標準 ORT 要求）」。

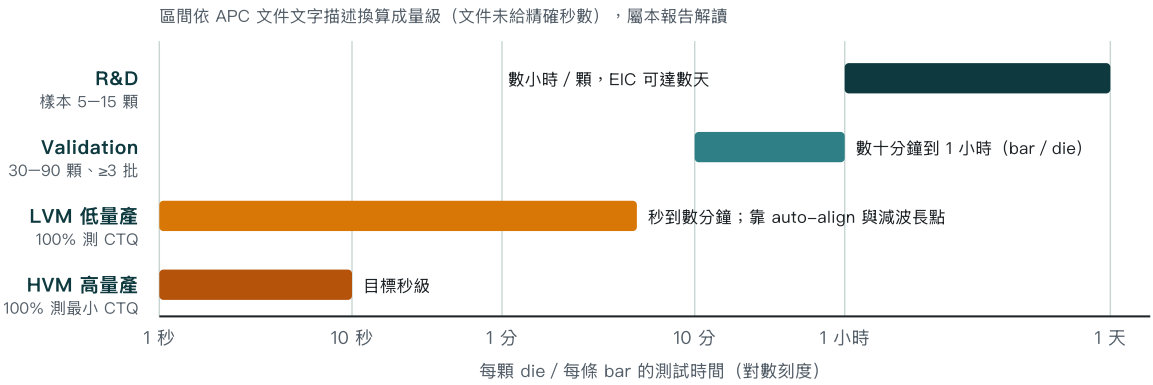


圖 3　四個階段的單顆測試時間量級（本報告依原文文字描述繪製）。APC 只用「數小時」「數十分鐘到一小時」「秒到數分鐘」「秒級」等文字描述，本圖把它們換成對數時間軸上的區間，顯示從 R&D 到 HVM 每顆測試時間差了三到四個數量級，這正是測試項目必須大幅收斂的原因。依據：APC CPO 測試程序各節 Duration 段，2026-10-09。

4　Insertion #1 晶圓級

#1 是整條流程的第一道關卡：EIC 和 PIC 還各自在自己的晶圓上，還沒整合。文件把它拆成兩套程序：2.1 純電、2.2 純光。

4.1（原文 2.1）EIC 電到電（E–E）

文件事實 測純電 IC 的電性與環境特性，屬成熟的數位 / 類比 / 混合訊號 IC 測試（原文標題漏印「2.1」節號，副標為「Electrical & Environmental Parameter Coverage」）。四個階段的機台文字都是：帶 DC 與 RF 定位器的探針台、SMU 類直流電源、RF 訊號產生器，配溫控夾頭或外接溫箱；差別在 R&D 為桌上型手動、Validation 為半自動或全自動、LVM / HVM 為全自動軟體控制並加晶圓 loader（只有 LVM 段提到選配 SECS/GEM）。圖中輸出端接直流表與 RF 分析儀。

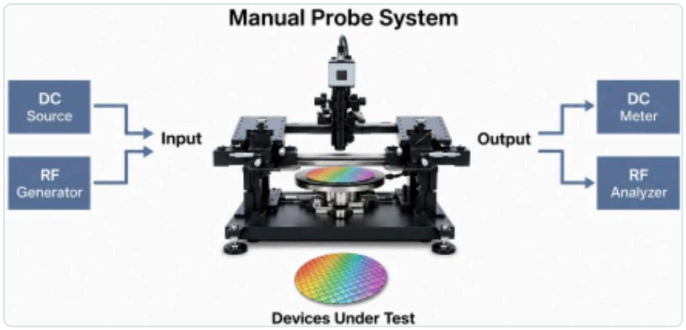
階段	量什麼	條件 / 抽樣 / 時間
R&D	目的：建立設計餘裕、找失效機制、產生定 Validation 限值的資料。所有電源與 I/O 腳全 I–V 掃描；Vdd 工作範圍、Idd（運作 / 待機 / 睡眠）對電壓與溫度；全腳漏電 Ileak；VIH / VIL / VOH / VOL 跨電源與溫度角；低 / 標稱 / 最高時脈功能測試與時序餘裕（setup / hold、傳遞延遲）；上升下降時間、驅動強度、slew rate；PSRR 與電源雜訊敏感度；ESD（JS–001 HBM、JS–002 CDM，破壞性、只抽部分樣品）；latch–up（JESD78）；類比 / 混訊區塊（bandgap、PLL 鎖定範圍與抖動、ADC/DAC 線性度）。環境：極值溫度長時間停留看漂移與穩定	5—15 顆工程樣品（盡量跨多批、多製程角）；−40° C 到 +125° C，每 10° C（關鍵區 5° C）一階；熱循環抽樣 10—20 次比較前後；保留全部原始波形；不設 pass/fail；每顆數天可接受
Validation	目的：確認符合 R&D 導出的規格、建立 ATE 與實驗桌量測相關性、驗證測試程式覆蓋率。R&D 清單縮成規格相關子集並定 LSL / USL；Idd、Ileak、邏輯準位於 Vdd min / typ / max；規格頻率時序、setup / hold 餘裕、驅動 / slew 合規；Vdd × 溫度 3×3 或 3×5 實驗設計；ESD go/no–go（抽樣，依 JS–001 / 002 等級目標）；latch–up 抽樣；測試間、顆間相關；關鍵參數 Gauge R&R。環境：熱循環依 JESD22–A104 抽樣 100—500 次看漂移；封裝濕敏時依 JESD22–A113 做 MSL 前處理；可靠度若併入此階段則抽樣跑 HTOL 前導	30—90 顆、跨 ⩾3 批；−40 / +25 / +125° C pass/fail；失效歸類為設計 / 製程 / 測試漏網；每批數天到數週
LVM	100% 只測 CTQ：Idd、Ileak、標稱條件邏輯準位、規格頻率功能 pass/fail；只做標稱電壓溫度（SPC 警示才加角）；guard band（比 Validation 收緊以涵蓋測試不確定度與 GR&R）；Xbar–R 類 SPC 盯前 5—10 個 CTQ；定期（例：每批首件）對 Validation 資料做相關；ESD / latch–up 不逐顆重測，只定期稽核。環境：每批抽部分做冷熱點檢；定期（例：每月或每批）縮減次數的熱循環稽核；SPC 異常即升級為 Validation 式全測	100% 電測；環境依抽樣計畫（例每批 1 顆或每 N 顆，依 AQL / Cpk）；SPC 失控即暫停調查；電測目標每顆數秒
HVM	100% 只剩 Idd、Ileak、單點功能 pass/fail；單一室溫、標稱 Vdd（設計餘裕需要時才加一次熱或冷 insertion）；快速分 bin（合格 / 不良 / 邊緣），以 PAT 自動標記離群；全部 CTQ 即時 SPC、自動停批；每週拉樣對 LVM / Validation 基線做相關稽核；ESD / latch–up 只靠製程與設計資格涵蓋。環境：產線不做；季度可靠度抽樣做熱循環、濕度、HTOL（照 Validation 協定）；製程、材料、設計任一變更都要先跑重新認證子集；監控客退與失效分析回饋	100% 電測；任何漂移超出 SPC 管制界限即停線；每顆秒級，環境抽樣排在主產線節奏之外

原文 Table 2　2.1 EIC E–E Summary Comparison（中文全譯）

面向	R&D	Validation	LVM	HVM
樣本數	5—15	30—90	100% 電測 / 抽樣環境	100% 電測 / 定期環境
電性覆蓋	全掃描、所有腳位	完整規格清單、各角落	CTQ 子集、加 guard band	最少 CTQ、單一條件

環境覆蓋	全範圍、探索性	完整規格極限、設關卡	抽樣、SPC 觸發	只做定期資格
測試時間優先度	低（重資料量）	中	高	最高
pass/fail 依據	無（產生資料）	正式限值	guard band 限值	緊 guard band、自動分 bin
溫箱使用	持續	頻繁	抽樣	罕見（季度）

Table 2 附註：參數名稱與限值要依 EIC 架構（數位、類比或混合訊號）與封裝調整；環境循環次數、MSL 前處理與可靠度參考（JESD22、JESD78、JS-001 / JS-002）要對齊專案選用的標準。



R&D：手動探針台



HVM：全自動探針台（兩種機型擇一）

圖 4　EIC 晶圓測試的機台從手動走到全自動。左（原文 Fig.1）：標題「Manual Probe System」，黑色桌上型探針台，上方顯微鏡、左右兩組定位器，晶圓放在中央夾頭；輸入為 DC Source、RF Generator，輸出為 DC Meter、RF Analyzer。右（原文 Fig.4）：兩台全自動機台以「OR」並列（左機帶側邊晶圓上料匣與雙螢幕、右為白色封閉式機台），輸入輸出相同。全文 47 張機台圖都採這種「左輸入儀器、中間機台、右輸出儀器、下方受測物」的版式，圖中未標廠牌。來源：APC CPO 測試程序，2026-10-09。

4.2（原文 2.2）PIC 光到光（O-O）

文件事實　測純光晶片在切割、封裝、任何電性或 burn-in 之前的光學性能。文件把它定位為**整條流程第一個自動化光學測試點**；光 I/O 經溝槽耦合器（trench coupler）、光柵耦合器或晶圓上的 FAU 介面進出。機台為一或兩個光學定位器、可調雷射光源 OLS、光功率計 OPM、光譜分析儀 OSA，選配 OFDR 與波長計；到 HVM 只剩 OLS＋OPM。

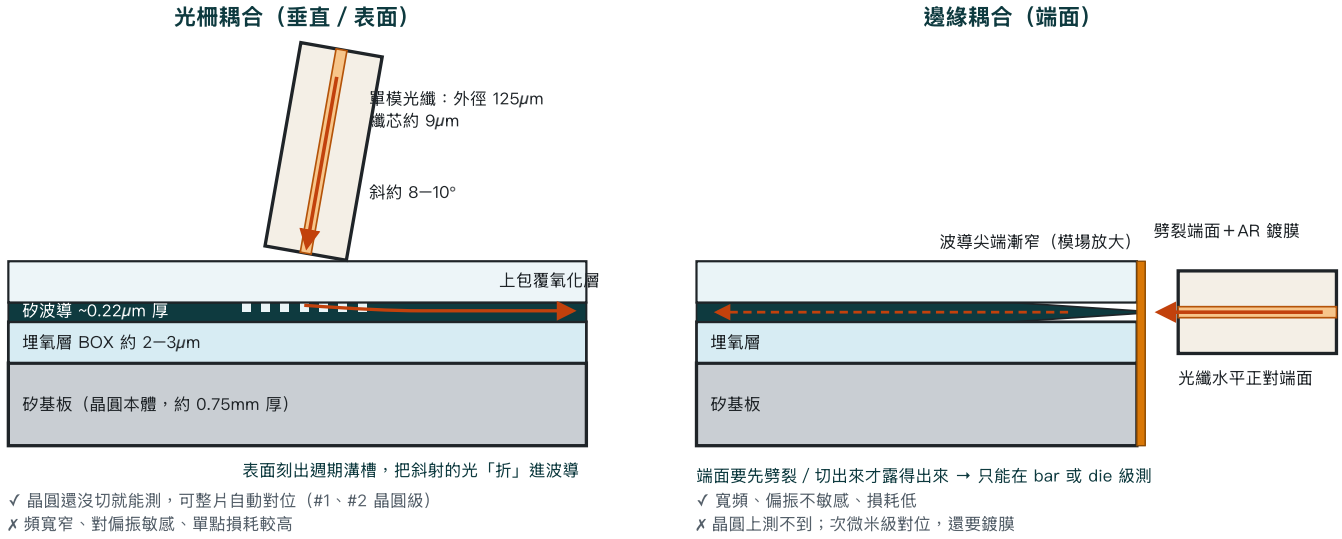
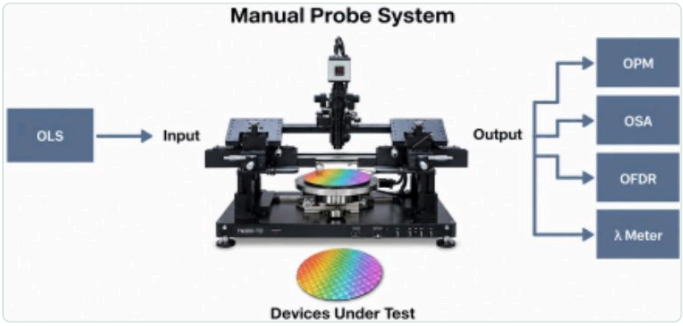


圖 5　光柵耦合與邊緣耦合的剖面差異（本報告自繪，不依比例）。左：光柵耦合在矽波導表面刻出週期溝槽，光纖斜約 8–10° 照下來，光被「折」進約 0.22 μm 厚的矽波導——晶圓還沒切就能測，所以 #1、#2 晶圓級測試能成立。右：邊緣耦合讓波導尖端漸窄、把模場放大到接近光纖纖芯（約 9 μm），光纖水平正對劈裂後鍍了 AR 膜的端面——寬頻、低損耗，但端面要切開才露得出來，所以只能在 bar 或 die 級測。尺寸數字屬一般技術常識；兩種耦合方式與測試站別的對應關係依據 APC CPO 測試程序第 2–5 章，2026-10-09。

階段	量什麼	條件 / 抽樣
R&D	目的：表徵光學性能與晶圓製程變異，分辨系統性與隨機性損耗來源。IL（光纖到光纖、各介面分段：耦合器、波導、PIC 區塊）；全波段 WDL（例 O-band 1260—1360 nm、C-band 1530—1565 nm）；PDL；各埠回損；耦合損耗與 1-dB 對位容差窗；光纖與波導模場直徑匹配；波導傳播損耗（cutback 結構或環形共振腔 Q 值）；通道串擾；有主動元件時加測消光比、光頻寬、PAM4 眼圖線性度、切換時間；環形 / MZI 熱調係數（pm/°C）；修整後共振波長對目標格點（含修整收斂與殘餘誤差）；調變器 Vπ 或 VπL；SOA 增益與飽和；有主動光源 / 放大器時量絕對輸出光功率；PD 響應度與暗電流；加熱器功耗對波長偏移（實際調諧效率）。環境：各參數隨溫度漂移；濕度在晶圓級只當參考；重新下針量對位重複性隨溫度的變化	每片 5—15 個 die 位置（中心、邊緣、製程梯度處），1—2 片；夾頭 −40° C 到 +85° C，每 10—20° C 一階；保留全部光譜與損耗原始曲線並畫晶圓空間分布；每顆可花數小時、全波長掃描
Validation	目的：確認晶圓級符合規格、建立晶圓針測對封裝件的相關性。R&D 清單縮為規格子集定 LSL / USL；IL 改為標稱＋波段邊緣共 3 或 5 點；PDL、回損按規格；有主動元件時於標稱偏壓量消光比 / 調變性能；auto-align 收斂性與重複性；溫度 × 波段邊緣 corner；**晶圓針測對封裝模組的相關性研究**（追部分 die 走完封裝）；Gauge R&R（重複下針）。環境：共振元件熱調係數驗證；晶圓圖均勻性（IL、WDL、PDL 跨 reticle / 晶圓）；以同批晶圓封裝後的熱循環、濕度結果回饋晶圓級限值	30—90 個 die、≥3 片 / 批；−40 / +25 / +85° C pass/fail；失效歸類新增「對位 / 治具假象」；每片數小時到一天
LVM	100%（或代表性 reticle 子集）只測 CTQ：標稱波長 IL、消光比（主動元件）、回損 go/no-go；只量 1—2 個波長點（SPC 警示才全掃）；guard band 涵蓋對位與測試不確定度；Xbar-R 或晶圓圖趨勢 SPC；定期（例每批首片）對 Validation 資料相關；PDL 與全波段 WDL 改抽樣。環境：每片 / 每批抽部分 die 冷熱點檢；共振結構熱調係數每批抽查；晶圓圖對基線抽查	環境 / 全光譜依抽樣計畫（例每批 1 片或每片 N 顆）；機台保留 OSA、OFDR 選配、不列波長計；每顆秒到數分鐘；**主要產能槓桿是 auto-align 速度與減少波長點數**
HVM	單波長 IL go/no-go、消光比 pass/fail、粗略回損；單一標稱條件（室溫、標稱偏壓、單波長）；快速分 bin 與離群標記；即時 SPC 與晶圓圖趨勢、自動停批；每週相關稽核；全 WDL / PDL 不在線上做。**定期量合格參考 die 或參考結構**，監控光學對位、波長準度、光功率校正、探針接觸穩定度、RF 路徑與整體 ATE 漂移；測試序列、auto-align、波長穩定時間、儀器設定與自動資料處理都要壓低非量測時間，但不得犧牲 CTQ 缺陷偵測力。環境：季度抽樣做溫度掃描與熱調係數；變更即重新認證；客退回饋	機台只剩 OLS＋OPM；SPC / 良率異常、重大製程或材料變更、影響量測相關的設備變更、晶圓空間異常時提高抽樣頻率；超出 SPC 或晶圓圖管制界限即停批；每顆秒級



R&D：OLS → OPM、OSA、OFDR、λ Meter



HVM：OLS → 只剩 OPM

圖 6　PIC 光學測試的儀器組從四台輸出收斂到一台。左（原文 Fig.5）：「Manual Probe System」，輸入為光源 OLS，輸出接光功率計 OPM、光譜分析儀 OSA、光頻域反射儀 OFDR、波長計 λ Meter，受測物為晶圓。右（原文 Fig.8）：「Automatic Probe System」，兩台全自動機台 OR 並列，輸出端只剩 OPM——HVM 線上光學測試的本質就是「對準後讀功率」。來源：APC CPO 測試程序，2026-10-09。

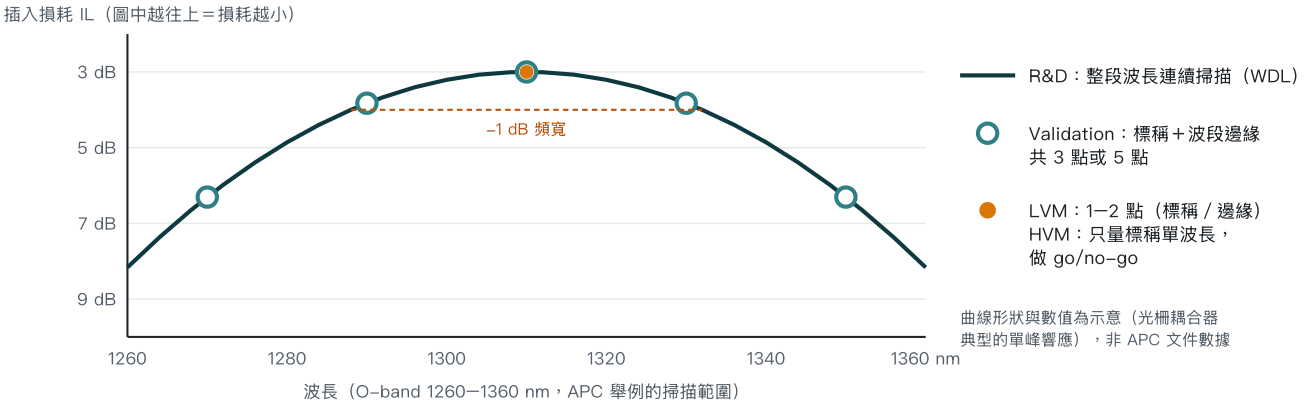


圖 7　同一條 IL 波長響應，四個階段各量幾個點（本報告自繪，曲線為示意）。R&D 連續掃整段波長（WDL）；Validation 只量標稱加波段邊緣共 3 或 5 點；LVM 量 1–2 點；HVM 只在標稱波長量一點做 go/no-go。每少一個波長點，就少一次雷射調波長與等待穩定的時間。各階段點數依據 APC CPO 測試程序 2.2 節，2026-10-09。

原文 Table 3　2.2 PIC O-O Summary Comparison（中文全譯）

面向	R&D	Validation	LVM	HVM
樣本數	5–15 die	30–90 die	100% CTQ / 抽樣環境	100% CTQ / 定期環境
光學覆蓋	全光譜掃描、所有埠	完整規格清單、各角落	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一波長
環境覆蓋	全範圍、探索性	完整規格極限、設關卡	抽樣、SPC 觸發	只做定期資格
對位方式	手動 / 半自動	auto-align（已驗證）	auto-align（鎖定）	auto-align（高速）
測試時間優先度	低（重資料量）	中	高	最高
pass/fail 依據	無（產生資料）	正式限值	guard band 限值	緊 guard band、自動分 bin
晶圓圖用途	完整空間映射	均勻性驗證	對基線抽查	只看趨勢

Table 3 附註：光學參數名稱與限值依 O-O PIC 架構（被動路由、主動調變 / 切換、共振元件等）、波段（O、C 或其他）與光 I/O 介面（邊緣耦合器、光柵耦合器、FAU）調整。**晶圓級天生限制環境覆蓋（濕度、熱循環），必須在封裝後的 insertion 正式補驗。**

5　Insertion #2 晶圓級 E-PIC

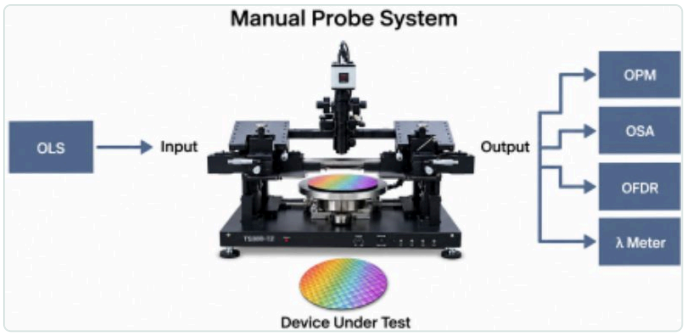
#2 的定義（全文最關鍵的一段） 文件事實

#2 發生在 #1 之後，且**中間隔一道會影響光學性能的後段製程**，例如：波長 / 共振修整（用雷射或熱退火修整環形或 MZI 元件）、鈍化或包覆層沉積、RDL（重佈線層）/ 凸塊形成、burn-in / 應力步驟。它是**切割前最後一道晶圓級光學關卡**，三個重點：（a）同一顆 die 與 #1 資料做 Δ 追蹤；（b）確認中間製程達標（例如修整收斂）；（c）必要時做最終波長 / 性能分級。光仍經溝槽或光柵耦合器、單通道光探頭或多通道 FAU 探頭進出，並用探針施加 DC / RF 偏壓驅動主動元件。

5.1（原文 3.1）E-PIC 光到光（O-O）

文件事實 R&D 機台（原文以表格呈現）為手動探針台加主動光纖對位（6 軸奈米定位器）＋DC/RF 探針卡或探針、兩個光學定位器、O/C-band 可調雷射、光功率計、偏振控制器、高速 BERT / PAM4 訊號源、OSA，選配 OFDR、波長計（原文此段有修訂痕跡殘留，刪改字句混在一起）。Validation 起的機台文字改回與 2.2 PIC 相同的「一或兩個光學定位器＋OLS＋OPM＋OSA（LVM 起 OFDR 選配、不列波長計；HVM 只剩 OLS＋OPM）」，**沒有再提 DC/RF 探針**，但摘要表的「探針存取」列各階段都寫光、DC、RF 三者並存。原文 Fig.10 圖說誤植為「3.1.1 R&D-Level – Manual Probe System」，實際小標與圖面為 Validation 半自動機台；3.1.3 LVM 機台段最後一句被截斷。

階段	量什麼	條件 / 抽樣 / 時間
R&D	目的：量化中間後段步驟相對 #1 基線的效應，建立 #2 專屬規格與相關模型。與 #1 逐顆比較的 Δ-IL（標稱波長與偏壓）；全波段 WDL；修整後共振波長對格點（含修整收斂與準度分析）；PDL；回損；1-dB 對位容差；相鄰通道串擾；**電光響應**：Vπ、調變器頻寬（S21 / E-O 響應）、消光比對偏壓、chirp、SOA 增益飽和曲線、切換時間（皆與 #1 比 Δ）；代表性速率下的 PAM4 眼圖線性度與 TDECQ；偏壓範圍內的 RIN；熱調係數與加熱器功耗對波長偏移（確認修整 / 退火達到目標調諧範圍與效率）；逐顆找出被製程「弄壞」與被修整「救回」的 die。環境：Vπ 偏移、消光比劣化、波長 / 熱調漂移對照 #1 的溫度相依資料，抓製程造成的溫度敏感度變化；重新下針區分量測雜訊與真實製程偏移	每片 5–15 個 die，與 #1 量過的同一顆 die 配對，1–2 片；−40° C 到 +85° C，每 10–20° C 一階；原始資料逐顆對應 #1 紀錄並畫空間分布；不設 pass/fail；每顆數小時、全波長與偏壓掃描
Validation	目的：確認符合 #2 規格、驗證 #1→#2 die 級相關模型、確認修整 / 後段製程能力。IL 3/5 點並設 Δ-IL 上限；共振 / 通道波長對格點與修整能力 Cpk；PDL、回損；標稱偏壓下消光比、Vπ、調變頻寬；TDECQ / 眼罩單一條件；auto-align 收斂與重複性；溫度 × 偏壓 × 波段邊緣 corner；**把 #1 對 #2 的相關模型正式化（回歸與限值設定），評估能否用 #1 當預測篩選**；晶圓對封裝相關性；Gauge R&R。環境：熱調係數與加熱器功耗對修整後目標；晶圓圖（IL、WDL、PDL、Vπ、消光比、波長）；以封裝後熱循環結果回饋 #2 限值	30–90 個 die、≥3 片 / 批，全部配對 #1；−40 / +25 / +85° C pass/fail；含對 #1 的 Δ 限值；失效歸類五類（設計 / 製程 / 修整或後段 / 測試漏網 / 對位治具）；每片數小時到一天
LVM	CTQ：標稱波長 IL、修整後共振波長 go/no-go、消光比、Vπ go/no-go、回損 go/no-go；1–2 個波長點；guard band；SPC 含修整製程 Cpk 追蹤；定期（例每批首片）對 Validation 資料與 #1 相關模型檢查；PDL、全波段 WDL、調變頻寬改抽樣。環境同 2.2 LVM	100% die（或 reticle 子集）；修整 Cpk 漂移也觸發暫停；每顆秒到數分鐘；產能槓桿：auto-align、減少波長點、**單一偏壓點**
HVM	IL（單波長 go/no-go）、共振波長 go/no-go、消光比、Vπ pass/fail、粗略回損；單一標稱條件；快速分 bin 與離群標記，**若最終分級在此站做，就在此做波長 / 性能分 bin**；即時 SPC 與晶圓圖；每週稽核對 LVM / Validation 基線及 #1 模型；WDL / PDL、調變頻寬、TDECQ 只定期抽樣。環境：季度抽樣；製程、材料、**修整**或設計變更即重新認證；客退回溯到晶圓級或修整製程特徵	機台 OLS＋OPM、晶圓 loader、選配 SECS/GEM；每顆秒級

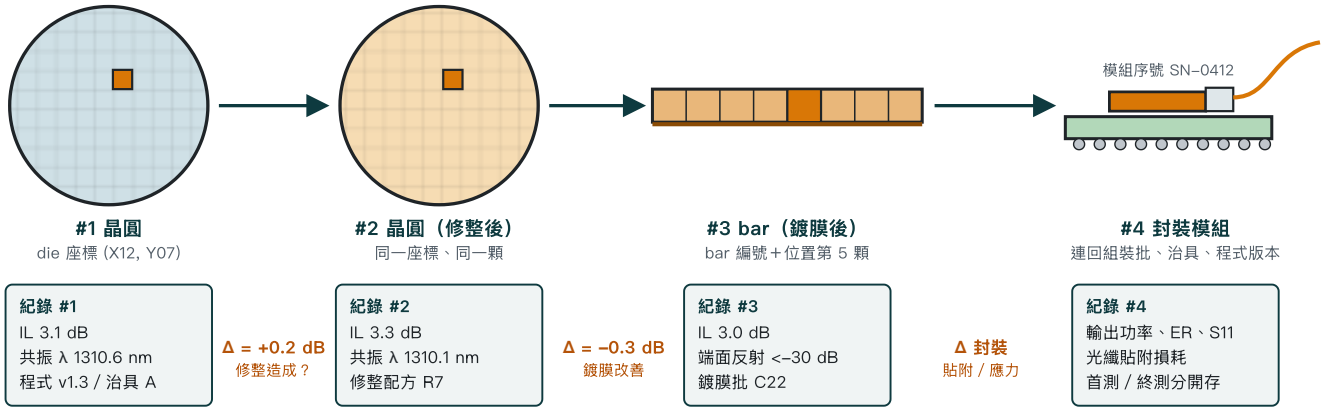


R&D：手動探針台（機身可見 TS300-TZ 字樣）



HVM：全自動（左機帶晶圓 loader）→ OPM

圖 8　#2 E-PIC 光到光測試機台。左（原文 Fig.9）：「Manual Probe System」，機身前緣可見「TS300-TZ」字樣（圖中未標廠牌），OLS 輸入，輸出 OPM、OSA、OFDR、λ Meter。右（原文 Fig.12）：「Automatic Probe System」，左機帶晶圓上料機構，與白色封閉式機台 OR 並列，輸出只剩 OPM。來源：APC CPO 測試程序，2026-10-09。



數值為示意，非 APC 文件數據；APC 要求的是「同一顆 die 跨站紀錄可串接」這個架構，以及 Validation 把 Δ 正式化成相關模型

圖 9　「同一顆 die」跨站 Δ 追溯的實際長相（本報告自繪，數值為示意）。同一顆 die 在 #1、#2 以晶圓座標識別，到 #3 以 bar 編號與位置識別，到 #4 以模組序號識別；每一站的紀錄都要能串回前一站，才算得出「修整讓 IL 多了 0.2 dB」「鍍膜讓 IL 少了 0.3 dB」這種 Δ。APC 要求 die 級追溯從 R&D 就建成基礎設施（原文 Table 4 附註）。依據：APC CPO 測試程序第 3–6 章，2026-10-09。

原文 Table 4　3.1 E-PIC O-O（#2）Summary Comparison（中文全譯）

面向	R&D	Validation	LVM	HVM
樣本數	5–15 die	30–90 die	100% CTQ / 抽樣環境	100% CTQ / 定期環境
光學 / 電光覆蓋	全光譜＋偏壓掃描、對 #1 Δ	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件
環境覆蓋	全範圍、探索性	完整規格極限、設關卡	抽樣、SPC 觸發	只做定期資格
相關性焦點	#1 vs #2 Δ 表徵	正式化相關模型	定期模型檢查	定期模型檢查
對位方式	手動 / 半自動	auto-align（已驗證）	auto-align（鎖定）	auto-align（高速）
探針存取	光、DC、RF；手動 / 半自動	光、DC、RF；auto-align（已驗證）	光、DC、RF；auto-align（已驗證）	光、DC、RF；auto-align（高速）
測試時間優先度	低	中	高	最高
pass/fail 依據	無（產生資料）	正式限值＋Δ 限值	guard band 限值	緊 guard band、自動分 bin
晶圓圖用途	完整空間映射	均勻性驗證	對基線抽查	只看趨勢

Table 4 附註：參數依 O-O E-PIC 架構（MZ 調變器、環形調變器、EAM、SOA、光開關陣列等）、波段、調變格式（NRZ、PAM4）與光 I/O 調整。**#1 與 #2 之間的那道後段步驟（修整 / 退火、鈍化、RDL / 凸塊、burn-in 等）必須在專案製程流程文件中明確寫出**，因為它決定哪些 Δ 參數最重要、#1 能否當預測預篩以縮小 #2 範圍；**die 級追溯（連結每顆 die 的 #1 與 #2 紀錄）是基礎設施要求，從 R&D 起就要建立**；晶圓級環境覆蓋有限（如熱循環），封裝後要正式補驗。

5.2（原文 3.2）E-PIC 光到電（O-E）：接收端

文件事實 測接收端（PD，或 PD＋TIA）。中間製程例：鈍化或抗反射（AR）鍍膜、RDL / 凸塊、TIA 修整 / 校正、burn-in；「達標確認」改為 TIA 增益修整收斂與鍍膜效果。光從輸入側（邊緣耦合器、光柵耦合器或 FAU）進，DC/RF 從輸出側量。機台為光、DC、RF 定位器，OLS，SMU 類直流量測、安培計、示波器（LVM / HVM 省去示波器）。**原文此節 R&D 小標誤植為「3.1.4 High Volume Manufacturing (HVM)」**，但其 Objective（完整表徵）、樣本（5–15 die）、手動探針台與 Fig.13（R&D Level）都是 R&D，確認實為 3.2.1。另外，**3.2.3 LVM 與 3.2.4 HVM 的機台文字都寫「Semi- or fully automatic」**（與 Validation 同句），也沒有提 SECS/GEM 與 ECO 鏈追溯，只加一句晶圓 loader；對應 Fig.15、Fig.16 為自動機台。Fig.14 圖中輸入方塊寫「OSL」（應為 OLS），Fig.16 圖說把 Volume、Manufacturing 拼錯。

階段	光學（輸入側）	電性（輸出側）
R&D	輸入功率範圍；耦合損耗與 1-dB 容差；回損（與 #1 比 Δ，抓 AR 鍍膜變化）；全波段響應度掃描；偏振相關響應度 PDR；過載門檻	暗電流對逆偏與溫度（Δ）；響應度 A/W（Δ）；接面電容對偏壓；3-dB 頻寬（S21）；TIA 轉阻增益、頻寬、輸出擺幅；輸入等效雜訊電流 / NEP；差動 CMRR；Idd；眼圖、PAM4 線性度、TDECQ；**靈敏度**（Δ）；過載
Validation	auto-align 收斂與重複性；輸入光功率範圍對規格；回損按規格並設對 #1 的 Δ 限值；響應度量標稱＋波段邊緣共 3 點	暗電流、響應度、TIA 增益於標稱偏壓對規格並設 Δ 上限；TIA 增益修整 Cpk；3-dB 頻寬；規格速率 / 格式下靈敏度、過載（含 Δ 限值）；TDECQ / 眼罩單一條件；**溫度 × 偏壓 × 輸入光功率**（各 min / typ / max）corner；#1→#2 相關模型正式化；晶圓對封裝相關；Gauge R&R。環境：−40 / +25 / +85° C pass/fail；晶圓圖（暗電流、響應度、靈敏度、頻寬）；以封裝後熱循環回饋限值。30–90 die、≥3 片配對 #1；失效歸類含「TIA 修整 / 鍍膜步驟」；每片數小時到一天
LVM	100% 標稱輸入功率下耦合 go/no-go、粗回損；全波長響應度、PDR 改抽樣	CTQ：暗電流 go/no-go、標稱響應度、TIA 增益 go/no-go、規格速率靈敏度 go/no-go；單一偏壓 / 溫度 / 功率點；guard band；SPC 含 TIA 修整 Cpk；定期（每批首片）對 Validation 與 #1 模型；全頻寬、TDECQ、過載改抽樣。環境：冷熱點檢、晶圓圖抽查（此節未列熱調係數）。每顆秒到數分鐘；槓桿為 auto-align 與單一條件
HVM	耦合 pass、粗回損；單一標稱條件（室溫、標稱波長、標稱功率）	暗電流 go/no-go、響應度 pass/fail、TIA 增益 go/no-go、單一速率靈敏度 pass/fail；快速分 bin，最終分級若在此站則在此做性能分級；即時 SPC 與晶圓圖；每週稽核含 #1 模型；頻寬、TDECQ、過載、雜訊不在線上測。季度抽樣做溫度掃描、暗電流、響應度、頻寬；變更含修整即重新認證



R&D：OLS → DC Meter、Ampere Meter、Oscilloscope



HVM：OLS → DC Meter、Ampere Meter

圖 10　接收端測試：光進、電出。左（原文 Fig.13）：「Manual Probe System」（機身 TS300-TZ），輸入只有光源 OLS，輸出全是電性儀器：直流表、安培計、示波器。右（原文 Fig.16）：兩台自動機台 OR 並列（左機帶 loader），輸出剩直流表與安培計——量產線上不看波形，只量電流。來源：APC CPO 測試程序，2026-10-09。

原文 Table 5　3.2 E-PIC O-E（#2）Summary Comparison（中文全譯）

面向	R&D	Validation	LVM	HVM
樣本數	5–15 die	30–90 die	100% CTQ / 抽樣環境	100% CTQ / 定期環境
光學覆蓋	全功率 / 波長 / PDR 掃描、對 #1 Δ	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件
電性覆蓋	全偏壓、頻寬、雜訊、BER 掃描、對 #1 Δ	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件
環境覆蓋	全範圍、探索性	完整規格極限、設關卡	抽樣、SPC 觸發	只做定期資格
相關性焦點	#1 vs #2 Δ 表徵	正式化相關模型	定期模型檢查	定期模型檢查
對位方式	手動 / 半自動	auto-align（已驗證）	auto-align（鎖定）	auto-align（高速）
探針存取	光、DC、RF；手動 / 半自動	光、DC、RF；auto-align（已驗證）	光、DC、RF；auto-align（已驗證）	光、DC、RF；auto-align（高速）
測試時間優先度	低	中	高	最高
pass/fail 依據	無	正式限值＋Δ 限值	guard band 限值	緊 guard band、自動分 bin
晶圓圖用途	完整空間映射	均勻性驗證	對基線抽查	只看趨勢

Table 5 附註：架構差異（獨立 PD vs PD＋TIA、APD vs PIN、差動 vs 單端）、波段、NRZ / PAM4、光 I/O 會改變參數名稱；中間後段步驟（鈍化 / AR 鍍膜、RDL / 凸塊、TIA 修整 / 校正、burn-in）要寫進流程文件；die 級追溯從 R&D 起建立；**靈敏度與過載需要在晶圓探針平面有可追溯校正的光功率基準，而且 #1 與 #2 的校正鏈要一致，Δ 才有意義**；濕度、熱循環要封裝後補驗。（原文目錄把此表所屬小節誤標為「3.1.5」，正文標 3.2.5 正確。）

5.3（原文 3.3）E-PIC 電到光（E-O）：發射端

文件事實 測發射端（雷射＋調變器，或直調雷射）。中間製程例：波長 / 共振修整、**雷射腔修整**、鈍化 / 包覆、RDL / 凸塊、burn-in。電從輸入側進，光從輸出側（邊緣、光柵或 FAU）量。機台為光、DC、RF 定位器，OPM、OSA，選配波長計，SMU、RF 訊號產生器——**不需要外部光源，因為光由受測物自己發。全文查證屬實：3.3.2 Validation、3.3.3 LVM、3.3.4 HVM 三段的 Test Station 首句都寫「Benchtop-style (manual) probe system」**，與 R&D 段幾乎一字不差；但 Validation 段小標與 Fig.18 是「Semi-Automatic Probe System」，LVM、HVM 段同一節裡又寫「晶圓 loader 全自動上下片」「選配 SECS/GEM」，Fig.19、Fig.20 也是自動機台——機台首句為原文複製未改，應依小標與圖讀為半自動 / 全自動。儀器差異：LVM 不列波長計，HVM 只剩 OPM＋SMU＋RF 產生器。

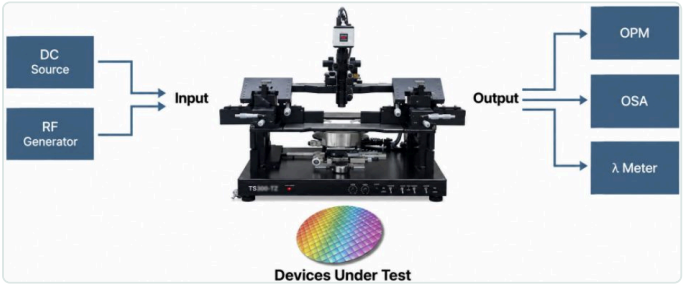
階段	電性（輸入側）	光學（輸出側）
R&D	雷射偏壓、調變器驅動、晶片上 TEC 全 I-V 並與 #1 比 Δ-Idd、Δ-閾值；Idd 對電壓溫度；漏電；RF 輸入回損 S11；輸入靈敏度（達規格調變所需最小驅動擺幅）	L-I 曲線及對溫度；閾值電流與斜率效率；修整後中心波長；頻譜寬度、SMSR；消光比對驅動；OMA 與平均功率；RIN；眼圖、PAM4、TDECQ；chirp；1-dB 對位容差；回損；熱調係數
Validation	Idd、Ileak、偏壓於標稱 / 最小 / 最大電源角並設對 #1 的 Δ 上限；規格頻率 / 速率下 S11；輸入靈敏度對規格	L-I（閾值、斜率效率）加 Δ 上限；中心波長對格點、修整 Cpk；標稱偏壓 / 溫度下 SMSR；規格驅動下消光比、OMA、平均功率；TDECQ / 眼罩單一條件；auto-align；**溫度 × 偏壓** corner（此節沒有波長或功率軸）；#1→#2 相關模型正式化；晶圓對封裝相關；Gauge R&R。環境：−40 / +25 / +85° C；熱調係數與加熱器功耗對修整後目標；晶圓圖（閾值電流、波長、消光比、輸出功率）。30–90 die；每片數小時到一天

LVM	100% 標稱條件 Idd、Ileak；規格頻率 S11 go/no-go	CTQ：標稱偏壓輸出功率、修整後中心波長 go/no-go、消光比 go/no-go；單一偏壓 / 溫度點；guard band；SPC 含修整 Cpk；每批首片對 Validation 與 #1 模型；SMSR、TDECQ、完整 L-I 改抽樣。每顆秒到數分鐘
HVM	Idd go/no-go、S11 粗檢；單一標稱條件（室溫、標稱偏壓）	輸出功率（單波長 / 偏壓 go/no-go）、中心波長 go/no-go、消光比 pass/fail；快速分 bin，最終分級若在此站則做波長 / 性能分級；即時 SPC 與晶圓圖；每週稽核含 #1 模型；完整 L-I、SMSR、TDECQ 只在季度可靠度抽樣（溫度掃描、L-I、光譜）中做；變更含修整即重新認證

原文 Table 6　3.3 E-PIC E-O（#2）Summary Comparison（中文全譯）

面向	R&D	Validation	LVM	HVM
樣本數	5–15 die	30–90 die	100% CTQ / 抽樣環境	100% CTQ / 定期環境
光學覆蓋	完整 L-I、光譜、眼圖掃描、對 #1 Δ	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件
電性覆蓋	完整 I-V、S11 掃描、對 #1 Δ	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件
環境覆蓋	全範圍、探索性	完整規格極限、設關卡	抽樣、SPC 觸發	只做定期資格
相關性焦點	#1 vs #2 Δ 表徵	正式化相關模型	定期模型檢查	定期模型檢查
對位方式 / 探針存取	手動 / 半自動；光、DC、RF	auto-align（已驗證）	auto-align（鎖定）；探針存取寫「已驗證」	auto-align（高速）
測試時間優先度	低	中	高	最高
pass/fail 依據	無	正式限值＋Δ 限值	guard band 限值	緊 guard band、自動分 bin
晶圓圖用途	完整空間映射	均勻性驗證	對基線抽查	只看趨勢

Table 6 附註：參數依 E-O 架構（直調雷射、EML、整合雷射＋外調變器等）、波段、NRZ / PAM4、光 I/O 調整；中間後段步驟要寫進流程文件；die 級追溯從 R&D 起建立；晶圓級環境覆蓋（熱循環）有限，封裝後補驗。



R&D：DC Source、RF Generator → OPM、OSA、λ Meter



HVM：DC Source、RF Generator → OPM

圖 11　發射端測試：電進、光出，沒有外部光源。左（原文 Fig.17）：手動探針台（機身 TS300-TZ），輸入是直流源與 RF 訊號產生器，輸出是光功率計、光譜分析儀、波長計。右（原文 Fig.20）：兩台自動機台 OR 並列，輸出只剩光功率計。和圖 6 對照可見：輸入輸出儀器的種類，直接由訊號方向決定。來源：APC CPO 測試程序，2026-10-09。

6　Insertion #3 bar 級

文件事實 為什麼要有 bar 級？晶圓先劈裂成 bar（一整排還連在一起的 die）後，端面（facet）才會露出來，而**端面的 AR / HR 鍍膜只能在劈裂露出端面之後才鍍**；此外也可能在 bar 上做 burn-in / 老化。#3 bar 級是最終切單與封裝前，最後一道端面耦合光學關卡。光從**劈裂且鍍膜後的端面直接邊緣耦合**進出，多通道 bar 用 pitch 匹配的光纖陣列；DC/RF 用探針或 bar 級探針卡（原文寫「與 bar 級 Insertion #1 一致」，但 #1 是晶圓級，屬筆誤）。#3 的三個重點：（a）同一顆 die（現在在 bar 上）與 #2 晶圓資料比 Δ；（b）端面鍍膜反射率與耐久度是否達標；（c）burn-in 造成的漂移。

先讀這段：bar 級三節的原文品質差異（全文查證結果）

4.1 O-O 的 Scope、參數、Note 都是真正的 bar 級內容（端面鍍膜、burn-in），只有 Table 7 的覆蓋列與相關性焦點照抄 3.3。**4.2 O-E** 的 Scope 與參數清單，逐句比對後確認就是 5.2 die 級 O-E 程序把「die」全部替換成「bar」：Scope 出現「Bar-level testing (rather than bar-level)」「光學存取不需要劈裂端面、光柵耦合」「流程從晶圓切割直接到單條 bar、不經 bar 測試步驟」等自相矛盾句，參數也完全沒有端面鍍膜或 burn-in 項目，只多了 bar-attach；它的 Table 8 附註又是 4.3 E-O 的附註原文。**4.3 E-O** 的 Scope 是 4.2 Scope 原封不動複製（仍寫 Optical-to-Electrical、接收端 PD），但 Objective 與參數是正確的鍍膜 / burn-in 後發射端內容；Validation、LVM、HVM 的機台首句也照抄「Benchtop-style (manual)」。結論：bar 級真正可用的是 4.1 全文與 4.3 的參數清單；4.2 讀作「bar 貼片後的接收端，參數同 die 級 O-E」較穩妥。

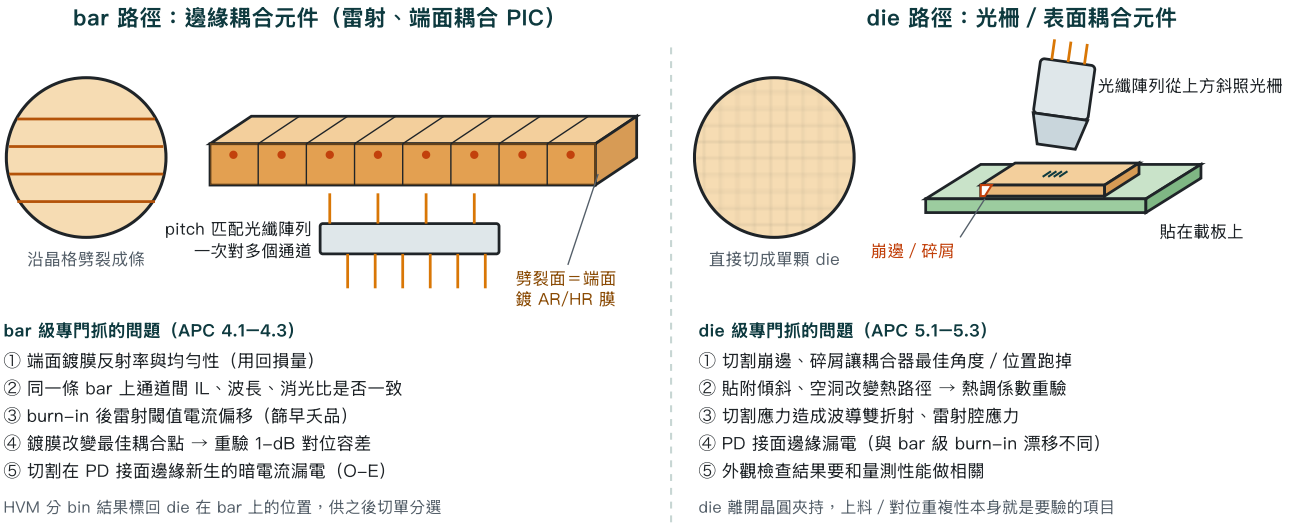
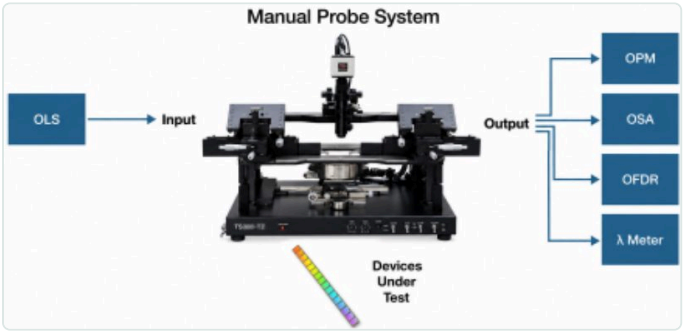


圖 12　bar 路徑與 die 路徑：各自為了什麼、抓什麼（本報告自繪）。左：晶圓沿晶格劈裂成條，劈裂面就是端面，整排一次鍍膜；光纖陣列以相同 pitch 正對端面，一次對多個通道。右：光柵耦合元件不需要端面，晶圓直接切成單顆 die、貼到載板上，光纖陣列從上方斜照光柵；切割崩邊、貼附傾斜是 die 級特有風險。兩欄條列的缺陷類型依據 APC CPO 測試程序第 4、5 章，2026-10-09。

6.1（原文 4.1）bar 級光到光（O-O）

文件事實 機台文字與 2.2 PIC 相同：R&D 手動、Validation 半自動或全自動，一或兩個光學定位器＋OLS＋OPM＋OSA（選配 OFDR、波長計）；LVM 全自動（OFDR 選配）、HVM 全自動只剩 OLS＋OPM。**原文瑕疵**：R&D 機台沒有列 DC/RF 定位器，但參數清單含 Vπ、S21 等需要電驅動的電光項目；LVM / HVM 段仍寫「晶圓 loader」，也完全沒提 MHU 或 ATE 對接站——這兩樣只出現在 Fig.23、Fig.24 的圖說。

階段	量什麼	條件 / 抽樣 / 時間
R&D	端面到端面 IL（標稱波長、偏壓）與 #2 比 Δ（分離鍍膜與 burn-in 的貢獻）；**以回損量各鍍膜端面的 AR / HR 反射率**對目標規格；鍍膜沿 bar 長度與 bar 間均勻性；WDL（查鍍膜造成的頻譜位移）；PDL；鍍膜後重驗 1-dB 對位容差（鍍膜厚度與折射率會改變最佳耦合條件）；光纖陣列與鍍膜端面的模場匹配；**bar 上通道間均勻性**（沿 bar 長度各 die 的 IL、波長、消光比）；相鄰通道串擾；電光響應（Vπ、S21、消光比對偏壓、chirp、SOA、切換時間）與 #2 比 Δ；PAM4 與 TDECQ；RIN；burn-in 前後 IL、消光比、波長 Δ；逐顆退步 / 進步分析。環境：Vπ、消光比、IL 溫漂對照 #2；bar 重新上料 / 下針，量端面耦合與 DC/RF 對位重複性隨溫度與搬運的變化	5–15 條 bar，可追溯者對應 #2 同一顆 die，跨多個晶圓 / 劈裂位置；bar 載台 −40° C 到 +85° C、每 10–20° C；資料連到 bar 位置與原晶圓位置；每條 bar 數十分鐘到數小時
Validation	IL 3/5 點＋對 #2 的 Δ-IL；鍍膜反射率對 AR / HR 目標與鍍膜製程 Cpk；PDL；消光比、Vπ、調變頻寬；TDECQ / 眼罩；光纖陣列對整條 bar 所有通道的 auto-align 收斂與重複性；通道均勻性限值；溫度 × 偏壓 × 波段邊緣 corner；#2 晶圓對 #3 bar 相關模型；**bar 對封裝模組相關性**（追部分 bar / die 走完切單與封裝）；Gauge R&R（重複上料）。環境：熱調係數；bar 間與 bar 內均勻性（IL、WDL、PDL、Vπ、消光比、鍍膜反射率）；以切單 / 封裝後熱循環、濕度回饋限值	30–90 條 bar、≥3 批；−40 / +25 / +85° C pass/fail；失效歸類六類（設計 / 製程 / 鍍膜 / burn-in / 測試漏網 / 對位治具）；每條數十分鐘到一小時
LVM	100% die-on-bar 測 CTQ：標稱波長 IL、消光比 go/no-go、**鍍膜反射率 go/no-go**；1–2 個波長點；guard band 涵蓋端面、對位與測試不確定度；Xbar-R 或 bar 圖趨勢 SPC，含鍍膜製程 Cpk；每批首條 bar 對 Validation 與 #2 模型；PDL、全波段 WDL、調變頻寬改抽樣；通道均勻性改抽查。環境：每批部分 bar 冷熱點檢；熱調係數每批抽查；bar 圖對基線抽查	抽樣計畫例：每批 1 條 bar 或每條 N 顆；鍍膜 Cpk 漂移也觸發暫停；每顆 die-on-bar 秒到數分鐘；槓桿為光纖陣列 auto-align 速度與減少波長點
HVM	IL（單波長 go/no-go）、消光比 pass/fail、鍍膜反射率 go/no-go；單一標稱條件；**分 bin 結果標記到 die 位置，供後續切單分選**；即時 SPC 與 bar 圖趨勢；每週稽核含 #2 模型；WDL / PDL、調變頻寬、TDECQ、通道均勻性映射只定期抽樣。環境：產線不做逐條 bar 環境測試；季度抽樣做溫度掃描與熱調係數；製程、材料、**鍍膜或 burn-in 配方**變更要重新認證；客退回溯到 bar 級或端面鍍膜特徵	超出 SPC 或 bar 圖管制界限即停批；每顆 die-on-bar 秒級



R&D：手動探針台，受測物是一條彩色 bar



HVM：探針台＋MHU＋ATE 對接站

圖 13　bar 級量產開始要求「探針台＋搬運塔＋ATE 測試頭」。左（原文 Fig.21）：「Manual Probe System」（機身 TS300-TZ），OLS 輸入，輸出 OPM、OSA、OFDR、λ Meter，下方受測物畫成一條斜放的彩色長條（bar）。右（原文 Fig.24）：標題「Automatic Probe System with MHU and ATE Docking Station」，左為旁接直立式物料搬運塔的黑色探針台，右為白色機台旁接灰色大型測試頭機櫃，OLS 輸入、OPM 輸出。晶圓級的量產圖（圖 6、8）都沒有這兩樣東西。來源：APC CPO 測試程序，2026-10-09。

原文 Table 7　4.1 bar O-O Summary Comparison（中文全譯；紅字為與本節正文不符、照抄 Table 6 的格子）

面向	R&D	Validation	LVM	HVM
樣本數	5–15 條 bar	30–90 條 bar	100% CTQ / 抽樣環境	100% CTQ / 定期環境
光學覆蓋	**完整 L-I、光譜、眼圖掃描、對 #1 Δ**	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件

電性覆蓋	**完整 I–V、S11 掃描、對 #1 Δ**	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件
環境覆蓋	全範圍、探索性	完整規格極限、設關卡	抽樣、SPC 觸發	只做定期資格
相關性焦點	**#1 vs #2 Δ 表徵**	正式化相關模型	定期模型檢查	定期模型檢查
對位方式	手動 / 半自動	auto-align（已驗證）	auto-align（鎖定）	auto-align（高速）
探針存取	光、DC、RF；手動 / 半自動	光、DC、RF；auto-align（已驗證）	光、DC、RF；auto-align（已驗證）	光、DC、RF；auto-align（高速）
測試時間優先度	低	中	高	最高
pass/fail 依據	無	正式限值＋Δ 限值	guard band 限值	緊 guard band、自動分 bin
晶圓圖用途（原文列名未改為 bar 圖）	完整空間映射	均勻性驗證	對基線抽查	只看趨勢

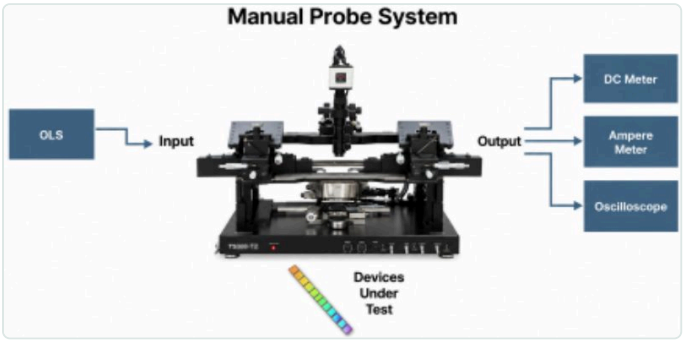
依本節正文，R&D 光學覆蓋應讀為「全光譜＋偏壓掃描、鍍膜反射率、通道均勻性、對 #2 Δ」，相關性焦點應為「#2 晶圓 vs #3 bar」。Table 7 附註（屬本節、內容正確）：參數依 O-O 架構、波段、NRZ / PAM4 與**端面鍍膜設計（AR、HR 或劈裂原面 as-cleaved）**調整；#2 與 #3 之間的 bar 級步驟（鍍膜、burn-in / 老化或兩者）要寫進流程文件，它決定哪些 Δ 最重要、前站資料能否預篩縮小 #3 範圍；die 級追溯要串起晶圓與 bar 紀錄；bar 級環境覆蓋（濕度、熱循環）有限，切單或封裝後補驗。

6.2（原文 4.2）bar 級光到電（O-E）

文件事實 測 bar 上（或 bar 貼到載板後）的接收端。重點是切割（刀切或雷射切）與貼附是否傷到 PD / TIA 或耦合：機械應力、熱路徑、膠或焊料應變，或**切割在 PD 接面邊緣新生的暗電流漏電路徑**。R&D 參數同本報告 5.2 節（原文 3.2）的輸入 / 輸出全套，外加：**暗電流與 #2 比 Δ 作為「切割完整性」主要篩選項**；機械應力造成的暗電流 / 響應度偏移；耦合器對位重驗（切割碎屑、崩邊、貼附傾斜會改變最佳耦合角度與位置）。環境 −40° C 到 +85° C，留意貼附材料造成的熱膨脹係數失配或熱路徑改變。Validation 把暗電流、響應度、TIA 增益加 Δ 上限，專門篩切割邊緣漏電，並建立 #2→#3 與 bar 對封裝的相關模型。LVM / HVM 的 CTQ 是暗電流 go/no-go（切割完整性）、響應度、TIA 增益、靈敏度，HVM 分 bin 結果標記到 bar；頻寬、TDECQ、過載、雜訊只抽樣。

階段	重點補充（原文 4.2.1–4.2.4）	樣本 / 機台 / 時間
R&D	光學輸入側：輸入功率範圍；光柵（或 bar 級）耦合器對位容差與耦合損耗重驗；全波段響應度（查切割或貼片造成的頻譜位移）；PDR；過載門檻；回損。電性輸出側：暗電流對逆偏與溫度並逐條 bar 對 #2 比 Δ（主要切割完整性篩選）；機械應力造成的暗電流或響應度偏移；響應度 Δ；Cj-V；3-dB 頻寬；TIA 增益 / 頻寬 / 擺幅；NEP；CMRR；Idd；眼圖、PAM4、TDECQ；靈敏度 Δ；過載。環境：bar / 載板載台 −40° C 到 +85° C，留意貼片材料的熱膨脹係數失配或熱路徑改變；bar 重新上料（re-pick）量對位重複性	5–15 條 bar 配對 #2，跨多個晶圓位置；手動台＋OLS、SMU、安培計、示波器；每條數十分鐘到數小時
Validation	耦合器對位專篩切割相關耦合劣化；輸入功率範圍；回損；響應度 3 點；暗電流、響應度、TIA 增益對規格並設 Δ 上限（專篩切割邊緣漏電）；3-dB 頻寬；靈敏度、過載 Δ；TDECQ；溫度 × 偏壓 × 輸入光功率 corner；#2→#3 相關模型；bar 對封裝相關；Gauge R&R。環境：bar 間與批間均勻性；以封裝後熱循環、濕度回饋限值	30–90 條 bar、≥3 批；半自動或全自動＋示波器；失效歸類六類（設計 / 製程 / 切割 / bar 貼片 / 測試漏網 / 對位治具）；每條數十分鐘到一小時

LVM	100% 耦合 go/no-go、粗回損；暗電流 go/no-go、標稱響應度、TIA 增益 go/no-go、規格速率靈敏度；單一偏壓 / 溫度 / 功率點；guard band 涵蓋切割、對位、測試不確定度；Xbar-R 或批趨勢 SPC，含切割 / 貼片 Cpk；首批抽樣對 Validation 與 #2 模型；全波長響應度、PDR、全頻寬、TDECQ、過載抽樣	100% bar；環境抽樣例每批 N 條；機台文字寫「半自動或全自動」＋晶圓 loader＋選配 SECS/GEM（無示波器）；Fig.27 圖說「with MHU」；每條秒到數分鐘
HVM	耦合 pass、粗回損，單一標稱條件；暗電流 go/no-go、響應度 pass/fail、TIA 增益 go/no-go、單一速率靈敏度；分 bin 標記到 bar 供下游封裝分選；即時 SPC 與批趨勢；每週稽核含 #2 模型；季度抽樣做溫度掃描、暗電流、響應度、頻寬；製程、材料、切割或貼片變更即重新認證	機台文字同 LVM；Fig.28 圖面標題含 ATE 對接站；超出 SPC 或批趨勢界限即停批；每條秒級



R&D：OLS → DC Meter、Ampere Meter、Oscilloscope



HVM：MHU＋ATE 對接站 → DC Meter、Ampere Meter

圖 14　bar 級接收端測試。左（原文 Fig.25）：手動探針台（機身 TS300-TZ），OLS 輸入，輸出直流表、安培計、示波器，受測物為 bar。右（原文 Fig.28）：「Automatic Probe System with MHU and ATE Docking Station」，搬運塔＋探針台 OR 白色機台＋灰色測試頭機櫃，輸出剩直流表與安培計。來源：APC CPO 測試程序，2026-10-09。

原文 Table 8　4.2 bar O-E Summary Comparison（中文全譯；紅字為屬 E-O 用語、與本節不符的格子）

面向	R&D	Validation	LVM	HVM
樣本數	5–15 條 bar	30–90 條 bar	100% CTQ / 抽樣環境	100% CTQ / 定期環境
光學覆蓋	**完整 L-I、光譜、眼圖掃描、對 #1 Δ**	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件
電性覆蓋	**完整 I-V、S11 掃描、對 #1 Δ**	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件
環境覆蓋	全範圍、探索性	完整規格極限、設關卡	抽樣、SPC 觸發	只做定期資格
相關性焦點	#2 晶圓 vs #3 bar 的 Δ、邊緣漏電篩選	正式化相關模型	定期模型檢查	定期模型檢查
對位方式 / 探針存取	手動 / 半自動；光、DC、RF	auto-align（已驗證）	auto-align（鎖定）；探針存取寫「已驗證」	auto-align（高速）
測試時間優先度	低	中	高	最高
pass/fail 依據	無	正式限值＋Δ 限值	guard band 限值	緊 guard band、自動分 bin
趨勢 / 圖用途	完整追溯到晶圓原位置	均勻性驗證	對基線抽查	只看趨勢

原文瑕疵（全文查證確認）：本節 Scope 段與 5.2 die 級 O-E 的 Scope 逐句相同，只把 die 換成 bar，因而出現「Bar-level testing (rather than bar-level)」「不需要劈裂端面、光柵耦合」「從晶圓切割直接到單條 bar、不經 bar 測試步驟」等矛盾句；R&D 參數也與 5.2.1 相同（少了逐顆 Δ 分析與外觀檢查相關兩項）。Table 8 光學、電性覆蓋兩列是 E-O 用語；Table 8 附註整段等於 Table 9（4.3 E-O）附註：講直調雷射 / EML 架構、端面鍍膜設計（AR、HR、as-cleaved）、#2→#3 的鍍膜或 burn-in 步驟，以及「雷射閾值電流偏移是 burn-in 主要篩選指標」，與接收端無關。本報告以參數清單為準，相關性焦點與趨勢列屬本節正確內容。

6.3（原文 4.3）bar 級電到光（E-O）

文件事實 測端面鍍膜與 burn-in 之後的發射端 bar（雷射＋調變器）。**全文查證屬實：原文 Scope 段與 4.2 O-E 的 Scope 逐字相同**（仍寫 Optical-to-Electrical、接收端 PD / TIA、光柵耦合不需劈裂端面），但 4.3.1 Objective 寫的是「鍍膜 / burn-in 後的電轉光與端面耦合性能」，參數也是發射端，依 Objective 與參數清單判斷為發射端。機台：R&D 為手動台＋光 / DC / RF 定位器、OPM、OSA（選配波長計）、SMU、RF 產生器（方向正確）；**Validation、LVM、HVM 三段的機台首句同樣照抄「Benchtop-style (manual)」**，但小標與 Fig.30（半自動）、Fig.31（自動＋MHU）、Fig.32（自動＋MHU＋ATE 對接站）以及同段「晶圓 loader」「選配 SECS/GEM」都指向自動化機台。

階段	量什麼
R&D	全 I-V 與 #2 比 Δ；L-I 曲線 Δ（分離鍍膜與 burn-in 貢獻）；**雷射閾值電流偏移——文件明定為 burn-in 的主要篩選指標**，比較 burn-in 前後以抓早期壽命劣化；斜率效率；輸出端面 AR/HR 鍍膜反射率（以回損量）；鍍膜均勻性；中心波長（鍍膜造成的位移）；頻譜寬度、SMSR；消光比 Δ；OMA；RIN；TDECQ；chirp；鍍膜後重驗耦合容差；bar 上通道均勻性
Validation	電性：Idd、Ileak、偏壓 corner 並設對 #2 的 Δ 上限；S11；輸入靈敏度。光學：L-I 加 Δ 上限；**閾值偏移對 burn-in 驗收準則（篩早夭品）**；鍍膜反射率對 AR / HR 目標與 Cpk；中心波長；SMSR；消光比、OMA、功率；TDECQ；光纖陣列全通道 auto-align；通道均勻性；溫度 × 偏壓 corner；#2→#3 相關模型；bar 對封裝相關；Gauge R&R。環境：−40 / +25 / +85° C；bar 間與 bar 內均勻性（閾值電流、波長、消光比、鍍膜反射率）；以切單 / 封裝後熱循環回饋限值。30–90 條 bar、≥3 批；失效歸類六類（含鍍膜、burn-in）；每條數十分鐘到一小時
LVM	電性 100% 標稱 Idd、Ileak，S11 go/no-go。光學 CTQ：標稱偏壓輸出功率、**閾值電流 go/no-go（burn-in 篩選）**、鍍膜反射率 go/no-go、消光比 go/no-go；單一偏壓 / 溫度點；guard band；Xbar-R 或 bar 圖 SPC 含鍍膜與 burn-in Cpk；每批首條 bar 對 Validation 與 #2 模型；SMSR、TDECQ、完整 L-I 抽樣。抽樣計畫例每批 1 條 bar 或每條 N 顆；每顆 die-on-bar 秒到數分鐘
HVM	Idd go/no-go、S11 粗檢；輸出功率（單波長 / 偏壓）、閾值電流、鍍膜反射率 go/no-go、消光比 pass/fail；分 bin 標記 die 位置供切單分選；即時 SPC 與 bar 圖；每週稽核含 #2 模型；完整 L-I、SMSR、TDECQ 只抽樣；季度抽樣做溫度掃描、L-I、光譜；鍍膜或 burn-in 配方變更要重新認證；客退回溯 bar 級或鍍膜特徵

原文 Table 9　4.3 bar E-O Summary Comparison（中文全譯；紅字為疑似照抄他節的格子）

面向	R&D	Validation	LVM	HVM
樣本數	5–15 條 bar	30–90 條 bar	100% CTQ / 抽樣環境	100% CTQ / 定期環境
光學覆蓋	完整 L-I、光譜、眼圖掃描，鍍膜 / burn-in Δ	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件
電性覆蓋	完整 I-V、S11 掃描、對 **#1** Δ（正文為對 #2）	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件
環境覆蓋	全範圍、探索性	完整規格極限、設關卡	抽樣、SPC 觸發	只做定期資格
相關性焦點	#2 晶圓 vs #3 bar 的 Δ、**邊緣漏電篩選**（屬接收端用語）	正式化相關模型	定期模型檢查	定期模型檢查
對位方式 / 探針存取	手動 / 半自動；光、DC、RF	auto-align（已驗證）	auto-align（鎖定）；探針存取寫「已驗證」	auto-align（高速）
測試時間優先度	低	中	高	最高
pass/fail 依據	無	正式限值＋Δ 限值	guard band 限值	緊 guard band、自動分 bin
趨勢 / 圖用途	完整追溯到晶圓原位置	均勻性驗證	對基線抽查	只看趨勢

Table 9 附註（屬本節、內容正確）：參數依 E-O 架構（直調雷射、EML、整合雷射＋外調變器）、波段、NRZ / PAM4 與端面鍍膜設計（AR、HR、as-cleaved）調整；#2 與 #3 之間的鍍膜、burn-in 步驟要寫進流程文件；**雷射閾值電流偏移被特別點名為 burn-in 的主要篩選指標——若 burn-in 是本站前一道製程，閾值偏移驗收準則要及早建立，當作關鍵可靠度關卡，而不只是性能參數**；die 級追溯串起晶圓與 bar 紀錄；濕度、熱循環要切單或封裝後補驗。

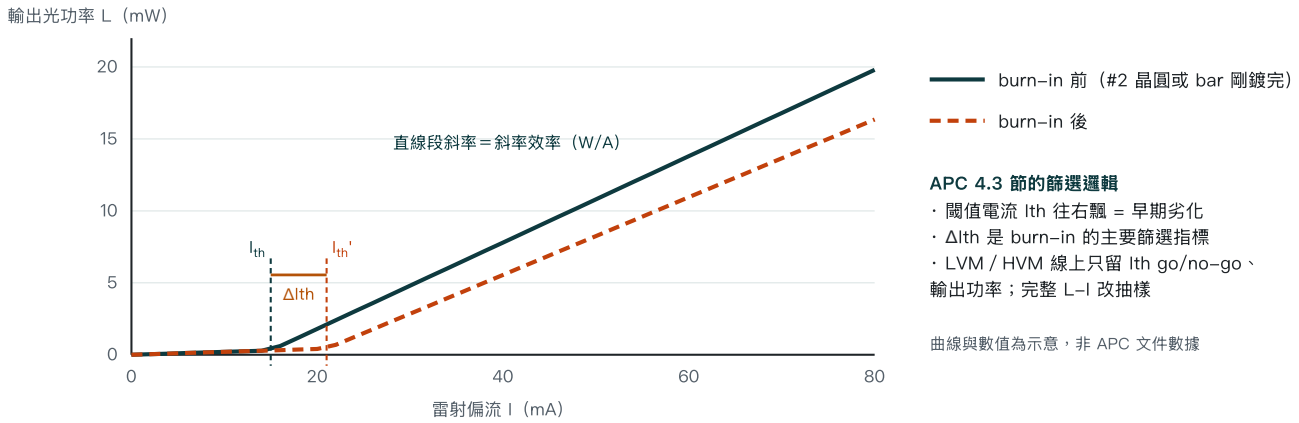
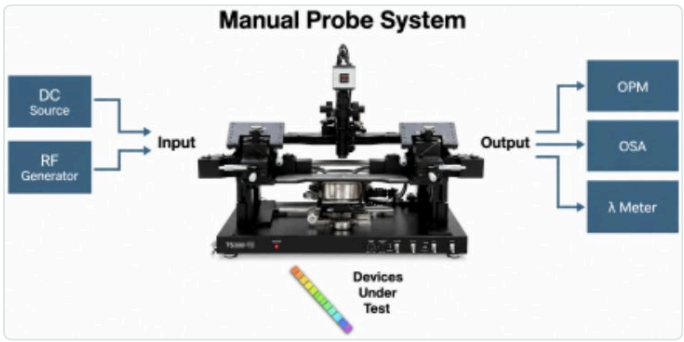


圖 15　burn-in 篩選看的是 L-I 曲線的閾值往右飄多少（本報告自繪，曲線與數值為示意）。雷射電流要超過閾值 Ith 才開始發光，之後輸出功率隨電流線性上升。burn-in 後若 Ith 明顯右移（ΔIth）、斜率變小，代表元件在早期就劣化。APC 4.3 節把 ΔIth 定為 burn-in 的主要篩選指標，並要求「及早建立閾值偏移驗收準則，當作可靠度關卡而非只是性能參數」（原文 Table 9 附註）。依據：APC CPO 測試程序 4.3 節，2026-10-09。



R&D：DC、RF → OPM、OSA、λ Meter



HVM：MHU＋ATE 對接站 → OPM

圖 16　bar 級發射端測試。左（原文 Fig.29）：「Manual Probe System」，直流源與 RF 訊號產生器輸入，輸出光功率計、光譜分析儀、波長計，受測物為 bar。右（原文 Fig.32）：「Automatic Probe System with MHU and ATE Docking Station」，輸出只剩光功率計。來源：APC CPO 測試程序，2026-10-09。

7　Insertion #3 die 級

文件事實 為什麼是 die 級而不是 bar 級？光 I/O 若是光柵耦合或其他垂直 / 表面耦合，**不需要劈裂端面**，流程就從晶圓切割直接到單顆 die，不經 bar 測試。#3 die 級發生在切單（必要時貼到載板）之後，是封裝前最後一道光學關卡。重點：與 #2 比 Δ；確認切割與貼附沒造成劣化；**die 脫離晶圓夾持後的搬運與對位重複性**。光由垂直 / 表面光纖陣列探頭（光柵耦合）或 die 級邊緣耦合治具進出；DC/RF 經探針或貼附後的載板焊墊。

> **bar 與 die 的切換規則（原文 Table 10 附註）**
> 此程序代表「直接切單」流程；**若實際製程是先切成 bar 做端面鍍膜、再切單，就改用 bar 級 #3，而 die 級變成更後面的 insertion 編號**。濕度與長時間熱循環仍要到封裝後補驗。

7.1（原文 5.1）die 級光到光（O-O）

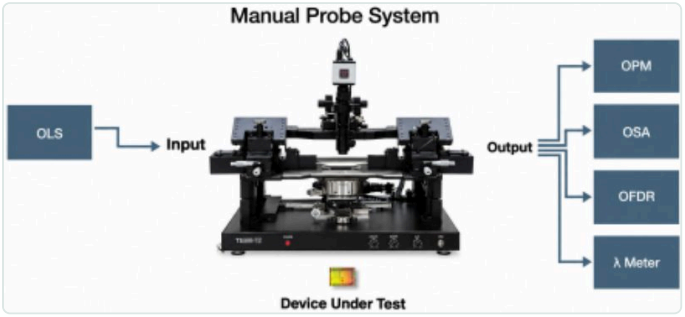
階段	量什麼
R&D	各介面 IL 與 #2 比 Δ（分離切割與貼附貢獻）；光柵或邊緣耦合器對位重驗（碎屑、崩邊、貼附傾斜）；WDL；PDL；回損；模場匹配；串擾；電光響應；TDECQ；RIN；熱調係數重驗（貼附改變熱路徑）；**機械應力造成的性能偏移（切割引起的應力雙折射或波導應力）**；退步 / 進步分析；**外觀檢查（崩邊、碎屑、貼附空洞或傾斜）與量測性能的相關性**
Validation	IL 3/5 點＋Δ；耦合器對位專門篩切割造成的耦合劣化；PDL、回損；消光比、Vπ、調變頻寬；TDECQ；corner；#2→#3 相關；die 對封裝相關；Gauge R&R（重複上料）；熱調係數含貼附熱路徑偏移
LVM	100% die 測 CTQ：標稱波長 IL、消光比 go/no-go、回損 go/no-go；1–2 個波長點；guard band 涵蓋切割 / 對位 / 測試不確定度；Xbar-R 或批趨勢 SPC，含切割 / 貼片製程 Cpk；首批抽樣對 Validation 與 #2 模型；PDL、全波段 WDL、調變頻寬抽樣。環境：每批部分 die 冷熱點檢；共振結構熱調係數每批抽查；批均勻性對基線抽查。環境抽樣例每批 N 顆；機台全自動＋OLS、OPM、OSA（OFDR 選配）＋「晶圓 loader」、選配 SECS/GEM，Fig.35 圖說「with MHU」；每顆秒到數分鐘
HVM	IL（單波長 go/no-go）、消光比 pass/fail、粗回損；單一標稱條件；分 bin 標記到 die 供下游封裝分選；即時 SPC 與批趨勢、自動停批；每週稽核含 #2 模型；全 WDL / PDL、調變頻寬只抽樣。季度抽樣做溫度掃描與熱調係數；製程、材料、切割或貼片變更即重新認證；客退回溯到 die 級或切割 / 貼片特徵。機台只剩 OLS＋OPM，Fig.36 為 MHU＋ATE 對接站；每顆秒級

R&D 補充：5–15 顆 die 配對 #2、跨多個晶圓位置；die / 載板載台 −40° C 到 +85° C，比對 #2 溫度相依資料，留意貼片材料造成新的熱膨脹係數失配；die 重新上料（re-pick）量對位重複性；資料連到原晶圓位置；每顆數十分鐘到數小時。R&D 機台同 4.1，只列光學定位器與光學儀器、未列 DC/RF 定位器。Validation：30–90 顆、≥3 批；−40 / +25 / +85° C；die 間與批間均勻性（IL、WDL、PDL、Vπ、消光比）；失效歸類六類（設計 / 製程 / 切割 / die 貼片 / 測試漏網 / 對位治具）；每顆數十分鐘到一小時。

原文 Table 10　5.1 die O-O Summary Comparison（中文全譯）

面向	R&D	Validation	LVM	HVM
樣本數	5–15 顆 die	30–90 顆 die	100% CTQ / 抽樣環境	100% CTQ / 定期環境
光學覆蓋	全光譜＋偏壓掃描、切割 / 貼片 Δ	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件
環境覆蓋	全範圍、探索性	完整規格極限、設關卡	抽樣、SPC 觸發	只做定期資格
相關性焦點	#2 晶圓 vs #3 die 的 Δ、**邊緣漏電篩選**（屬接收端用語，O-O 正文無此項）	正式化相關模型	定期模型檢查	定期模型檢查

對位方式 / 探針存取	手動 / 半自動；光、DC、RF	auto-align（已驗證）	auto-align（鎖定）；探針存取寫「已驗證」	auto-align（高速）
測試時間優先度	低	中	高	最高
pass/fail 依據	無	正式限值＋Δ 限值	guard band 限值	緊 guard band、自動分 bin
趨勢 / 圖用途	完整追溯到晶圓原位置	均勻性驗證	對基線抽查	只看趨勢



R&D：手動探針台，受測物是單顆 die



Validation：兩種 die 測試機擇一

圖 17　die 級光學測試機台。左（原文 Fig.33）：「Manual Probe System」（機身 TS300-TZ），OLS 輸入，輸出 OPM、OSA、OFDR、λ Meter，受測物縮成一顆小方形晶片。右（原文 Fig.34）：黑色帶橘色飾條的直立機台 or 白色開門機台（門內可見多組定位模組），輸出儀器相同。來源：APC CPO 測試程序，2026-10-09。

7.2（原文 5.2）die 級光到電（O-E）

文件事實 測接收端單顆 die，參數與本報告 6.2 節（原文 4.2，bar 級 O-E）相同但對象是 die：暗電流 Δ 作為切割完整性主篩；機械應力造成的暗電流 / 響應度偏移；耦合器重驗；響應度、接面電容、頻寬、TIA、NEP、CMRR、Idd、TDECQ、靈敏度、過載；外觀檢查相關性。LVM / HVM 的 CTQ 為暗電流 go/no-go、響應度、TIA 增益、靈敏度，HVM 分 bin 標記到 die。附註重點：切割可能在 PD 接面產生新的邊緣漏電路徑，**這和 bar 級 burn-in 造成的暗電流漂移是不同風險**；die 測試治具平面也要有可追溯光功率基準，且與 #2 校正鏈一致。

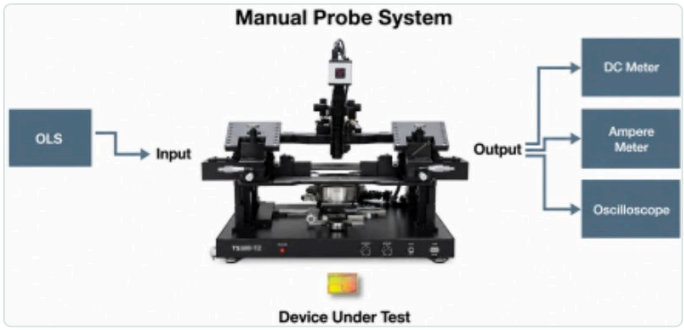
補充（原文 5.2.1–5.2.4）：R&D 5–15 顆 die 配對 #2，手動台＋OLS、SMU、安培計、示波器，die / 載板載台 −40° C 到 +85° C，每顆數十分鐘到數小時；Validation 30–90 顆、≥3 批，corner 為溫度 × 偏壓 × 輸入光功率，失效歸類六類（設計 / 製程 / 切割 / die 貼片 / 測試漏網 / 對位治具），每顆數十分鐘到一小時；LVM 與 HVM 的機台文字都寫「半自動或全自動」＋晶圓 loader＋選配 SECS/GEM（不含示波器），Fig.39 為「with MHU」、Fig.40 為「with MHU and ATE Docking System」；LVM 單一偏壓 / 溫度 / 功率點、SPC 含切割 / 貼片 Cpk、首批抽樣做相關；HVM 季度抽樣做溫度掃描、暗電流、響應度、頻寬。

原文 Table 11　5.2 die O-E Summary Comparison（中文全譯）

面向	R&D	Validation	LVM	HVM
樣本數	5–15 顆 die	30–90 顆 die	100% CTQ / 抽樣環境	100% CTQ / 定期環境
光學覆蓋	全光譜＋偏壓掃描、切割 / 貼片 Δ	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件
電性覆蓋	**完整 I-V、S11 掃描**、對 #2 Δ（I-V、S11 屬發射端輸入側用語；本節正文為暗電流、響應度、頻寬、雜訊、BER）	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件
環境覆蓋	全範圍、探索性	完整規格極限、設關卡	抽樣、SPC 觸發	只做定期資格
相關性焦點	#2 晶圓 vs #3 die 的 Δ、邊緣漏電篩選	正式化相關模型	定期模型檢查	定期模型檢查
對位方式 / 探針存取	手動 / 半自動；光、DC、RF	auto-align（已驗證）	auto-align（鎖定）；探針存取寫「已驗證」	auto-align（高速）
測試時間優先度	低	中	高	最高

pass/fail 依據	無	正式限值＋Δ 限值	guard band 限值	緊 guard band、自動分 bin
趨勢 / 圖用途	完整追溯到晶圓原位置	均勻性驗證	對基線抽查	只看趨勢

Table 11 附註：依 O–E 架構（獨立 PD vs PD＋TIA、APD vs PIN、差動 vs 單端）、波段、NRZ / PAM4、光 I/O（光柵或 die 級邊緣耦合）調整；本程序代表直接切單流程，若先切 bar 鍍膜，改用 bar 級 #3、die 級成為單一統一序列中更後面的 insertion；PD 暗電流特別點名為切割完整性篩選——即使中間沒有修整或鍍膜步驟，切割也可能在 PD 接面產生新的邊緣漏電路徑，與 bar 級強調的 burn–in 暗電流漂移是不同風險；靈敏度與過載需在 die 測試治具平面有可追溯光功率基準，校正鏈與 #2 一致；濕度與長時間熱循環要封裝後補驗。



R&D：OLS → DC Meter、Ampere Meter、Oscilloscope



HVM：MHU＋ATE 對接站 → DC Meter、Ampere Meter

圖 18　die 級接收端測試。左（原文 Fig.37）：手動探針台（機身 TS300–TZ），OLS 輸入，輸出直流表、安培計、示波器。右（原文 Fig.40）：「Automatic Probe System with MHU and ATE Docking Station」，搬運塔＋探針台 or 白色機台＋灰色測試頭機櫃。來源：APC CPO 測試程序，2026–10–09。

7.3（原文 5.3）die 級電到光（E–O）

文件事實 測切單 / 貼附後的發射端單顆 die：全 I–V Δ；L–I Δ；**閾值電流與斜率效率的機械應力偏移（切割應力影響雷射腔）**；耦合器重驗；中心波長；SMSR；消光比；OMA；RIN；TDECQ；chirp；回損；外觀檢查相關性。Validation 把 L–I 加 Δ 上限、專門篩切單造成的雷射腔應力。LVM / HVM 為 Idd、Ileak、S11；輸出功率、中心波長、消光比；HVM 分 bin 標記到 die。附註：**即使沒有修整或鍍膜步驟，切割應力也會改變雷射性能**，所以閾值與腔行為要做機械應力篩選。Scope 段方向正確（電進光出、DC/RF 在輸入側、光纖陣列在輸出側），沒有複製錯誤。**全文查證屬實：5.3.2 Validation、5.3.3 LVM、5.3.4 HVM 三段機台首句都照抄 R&D 的「Benchtop-style (manual)」**，但小標與 Fig.42（半自動）、Fig.43（自動＋MHU）、Fig.44（自動＋MHU＋ATE 對接站）以及同段的晶圓 loader、SECS/GEM 都指向自動化機台，應讀為半自動 / 全自動。

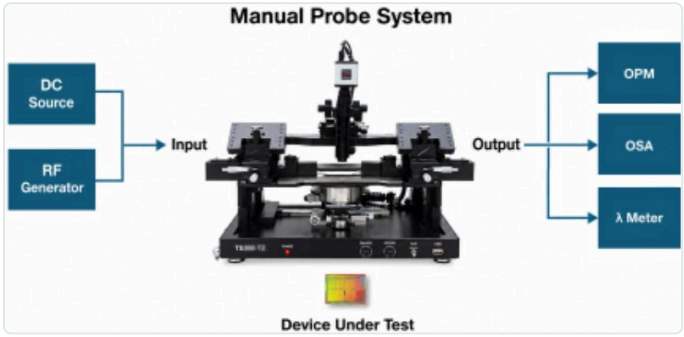
補充（原文 5.3.1–5.3.4）：R&D 5–15 顆 die 配對 #2，die / 載板載台 −40° C 到 +85° C，量閾值電流偏移、波長漂移、消光比劣化的溫漂並對照 #2；Validation 30–90 顆、≥3 批，L–I 的 Δ 上限專篩切單造成的雷射腔應力，corner 為溫度 × 偏壓，die 間與批間均勻性看閾值電流、波長、消光比、輸出功率，以封裝後熱循環、濕度回饋限值，失效歸類六類；LVM 100% Idd、Ileak、S11 go/no-go，光學 CTQ 為標稱偏壓輸出功率、中心波長、消光比 go/no-go（與 bar 級不同，沒有閾值電流與鍍膜反射率），SMSR、TDECQ、完整 L–I 抽樣；HVM 分 bin 標記到 die 供封裝分選，季度抽樣做溫度掃描、L–I、光譜。

原文 Table 12　5.3 die E–O Summary Comparison（中文全譯）

面向	R&D	Validation	LVM	HVM
樣本數	5–15 顆 die	30–90 顆 die	100% CTQ / 抽樣環境	100% CTQ / 定期環境
光學覆蓋	全光譜＋偏壓掃描、切割 / 貼片 Δ	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件
電性覆蓋	完整 I–V、S11 掃描、對 #2 Δ	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件
環境覆蓋	全範圍、探索性	完整規格極限、設關卡	抽樣、SPC 觸發	只做定期資格

相關性焦點	#2 晶圓 vs #3 die 的 Δ、**邊緣漏電篩選**（發射端正文的重點是雷射腔應力）	正式化相關模型	定期模型檢查	定期模型檢查
對位方式 / 探針存取	手動 / 半自動；光、DC、RF	auto-align（已驗證）	auto-align（鎖定）；探針存取寫「已驗證」	auto-align（高速）
測試時間優先度	低	中	高	最高
pass/fail 依據	無	正式限值＋Δ 限值	guard band 限值	緊 guard band、自動分 bin
趨勢 / 圖用途	完整追溯到晶圓原位置	均勻性驗證	對基線抽查	只看趨勢

Table 12 附註：依 E-O 架構（直調雷射、EML、整合雷射＋外調變器）、波段、NRZ / PAM4、光 I/O 調整；直接切單流程與 bar 流程的替換規則同 5.1、5.2；雷射閾值電流與腔行為要做切單後機械應力篩選；#2→#3 的中間步驟（只有切單，或切單加 die 貼片）要寫進流程文件；die 級追溯；濕度與長時間熱循環封裝後補驗。



R&D：DC、RF → OPM、OSA、λ Meter



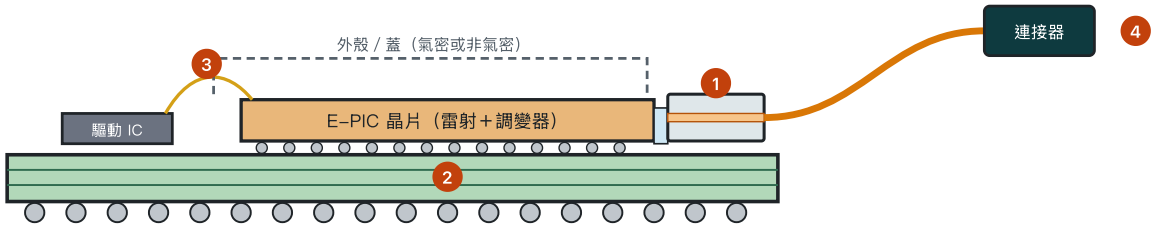
HVM：MHU＋ATE 對接站 → OPM

圖 19　die 級發射端測試。左（原文 Fig.41）：手動探針台（機身 TS300-TZ），直流源與 RF 訊號產生器輸入，輸出光功率計、光譜分析儀、波長計，受測物為單顆 die。右（原文 Fig.44）：「Automatic Probe System with MHU and ATE Docking Station」，輸出只剩光功率計。來源：APC CPO 測試程序，2026-10-09。

8　Insertion #4 封裝級（原文 6.1）

文件事實 #4 測**完整封裝的發射模組**（光纖尾纖或連接器化的光輸出、氣密或非氣密封裝、電腳位或連接器端接），在 #3 之後，是**出貨前最後一道 insertion**。這是**第一個能做完整環境應力（長時間熱循環、機械衝擊與振動）的站**，因為元件已有封裝保護、光纖已永久固定。三個重點：（a）與 #3 比 Δ，分離封裝造成的偏移（光纖貼附損耗、封裝應力、焊料或環氧樹脂釋氣、封裝寄生改變驅動負載）；（b）完整、具資格代表性的環境應力；（c）客戶實際收到的連接器 / 尾纖端光電性能。原文寫明「These three procedures」，只有 Validation、LVM、HVM 三個階段（原文標題漏印 6.1 節號；Scope 寫「發射模組」，但節名只寫 E-PIC、未分方向）。電存取經封裝端子、腳位或連接器（輸入側），光存取經永久尾纖或光連接器（輸出側）。Scope 另有兩條通則：**多光纖對位與治具上料**要先確認機械負載、應力消除（strain relief）與光介面位置在合格範圍內，才執行高速電、RF、光參數量測，可用主動力量監控、位移監控、strain-relief 位置驗證等方法辨識機械造成的量測誤差；**多通道元件**要維持通道級追溯，監控通道間均勻性與最差通道，避免單一通道劣化被可接受的模組平均值掩蓋。

封裝好的 E-PIC 發射模組剖面（示意，不依比例；APC #4 的受測物）

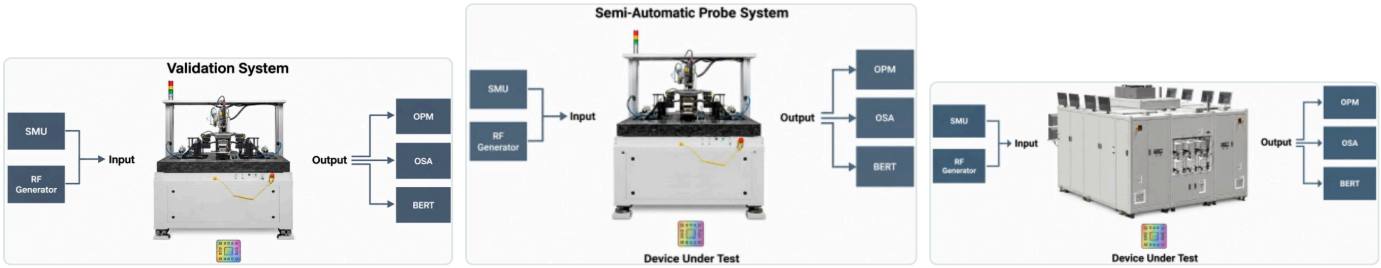


1 **光纖貼附：**膠固化收縮、位移 → 光纖貼附損耗；多通道要看最差通道，不能只看平均
2 **封裝應力：**焊料 / 環氧樹脂、熱膨脹係數差、釋氣 → 雷射閾值、波長、熱調效率偏移
3 **封裝寄生：**打線電感、導線架 / 連接器 launch → RF 輸入回損 S11、眼圖與 TDECQ 劣化（封裝才出現的新風險）
4 **客戶介面：**連接器 / 尾纖端的光電性能、插拔重複性、治具壽命；此站起才能做熱循環、濕熱、衝擊振動、HTOL

圖 20　封裝模組上，APC 點名的四類新風險各在哪裡（本報告自繪，不依比例）。E-PIC 晶片以微凸塊覆晶在基板上，驅動 IC 以打線相連，光纖陣列用膠固定在晶片端面，經光纖帶接到連接器。① 光纖貼附損耗、② 封裝應力、③ 封裝寄生（打線電感、連接器 launch）、④ 客戶端介面與環境可靠度，是 #4 相對 #3 新增的 Δ 來源。依據：APC CPO 測試程序 6.1 節與 Table 13 附註，2026-10-09。

階段	量什麼	樣本 / 機台 / 時間
Validation	**用途**：決定哪些 CTQ 在量產必須 100% 篩，哪些可轉為抽樣、即時 SPC、ORT 或製程資格管控。**電性**：Idd、Ileak、偏壓 corner 加 Δ（對 #3）；**封裝連接器 / 腳位端的 S11**；輸入靈敏度；控制、偏壓、監控、管理介面功能。**光學**：L–I 加 Δ；輸出功率；**光纖貼附損耗**；中心波長與 SMSR；消光比、OMA；TDECQ（含封裝頻寬限制造成的眼圖閉合）；連接器反射；#3→#4 相關模型；熱調效率、自熱與熱串擾（封裝可能大幅改變）。**環境**：全工作溫度 pass/fail；**正式可靠度序列：熱循環、濕熱、機械衝擊 / 振動、HTOL**（Telcordia GR–468、MIL–STD–883 或專案規格），**以雷射閾值偏移作為 HTOL 關鍵指標**；應力後回到標稱條件重測，區分可逆溫度效應與永久性封裝偏移	30—90 個模組、≥3 個組裝批，可追溯者配對 #3；可靠度資格樣本數依標準（例 Telcordia GR–468 抽樣計畫）；**刻意納入組裝製程變異**（不同組裝批、光纖 / FAU 貼附作業、膠或焊料固化批、die 貼附條件、組裝設備與治具群體），以分開元件本質變異與封裝製程變異。機台：量產代表性封裝模組測試組（連接器 / 尾纖光介面、端接電介面、自動化）、完整環境箱組（溫度、振動 / 衝擊）、測試程式正式版控；封裝電 / 光介面的校正參考面要明確定義，治具、連接器、線材、光纖、光開關等測試路徑貢獻要表徵或扣除；以合格黃金 / 參考元件監控機台漂移、光功率校正、波長準度、連接器重複性、電 / RF 路徑、治具重複性。失效歸類四類（設計 / 製程 / 封裝 / 測試漏網）。每批數天到數週（熱循環、HTOL 本身耗時），功能 / 光 / 電測試時間優化同步開始。資料連結模組序號、來源晶圓 / die、#3 紀錄、組裝批、機台、治具、程式版本、校正狀態與組裝製程履歷
LVM	100% CTQ（電：Idd、Ileak、S11 go/no–go、功能介面；光：標稱偏壓輸出功率、中心波長、消光比 go/no–go）；SMSR、TDECQ、完整 L–I 抽樣；**多通道看最差通道與通道離散度**；**重插、重新上治具、重測要有次數上限，首測結果與最終結果分開保存**；ORT 抽樣（例每批或每月 N 顆做熱循環、濕熱）	目的：確認組裝、光學貼附、電互連與測試製程批間穩定，並定出 HVM 最終測試內容與 guard band。機台：量產封裝模組測試組、**鎖定的測試程式版本**、依量產節奏校正、**ORT 專用環境箱**；軟體控制並版本管理，資料自動存檔做 SPC。guard band 涵蓋光纖貼附 / 連接器 / 測試不確定度；定期對 Validation 與 #3 模型；**室溫功能測試 100%**、溫度角落只抽樣點檢；光纖貼附、打線、連接器強固性在 ORT 樣本上抽查；ORT 異常即暫停並可能升級為 Validation 式完整重新認證。追溯：每筆紀錄保留模組序號、來源 die / 晶圓、封裝 / 組裝批、光學貼附 / 組裝製程識別、測試站、治具 / 介面識別、程式版本、校正狀態、CTQ 結果、bin 與重測履歷。抽樣涵蓋不同組裝設備、組裝單元、貼附工具、治具、材料批；每模組秒到數分鐘，ORT 另排程

HVM	100% 最小 CTQ（Idd go/no-go、S11 粗檢、功能介面、自動分 bin；輸出功率、中心波長、消光比）；完整 L-I、SMSR、TDECQ 只在 ORT；**產線不做逐顆環境測試，100% 產品只憑功能與光學測試出貨**；定期 ORT（例季度）做完整可靠度序列；治具要能重複上料而不對連接器或光纖施加影響量測的應力，並監控治具壽命與插拔次數	全自動封裝模組測試系統（自動 handler、高速測試排序、最少人工、即時良率 / SPC 儀表板）；功能介面驗證與自動 pass/fail/marginal 分 bin；每週稽核含 #3 模型；製程、材料、設計變更要重新認證；客退回饋用來檢討 ORT 計畫是否足夠；超出 SPC 或 ORT 失效即停批 / 停批族；每模組數秒、ORT 完全排在主產線外；追溯保存模組序號、來源晶圓 / die、#3 參照、組裝批等（原文此句列舉重複「模組序號」並以「and etc.」收尾，未寫完整）



Validation System　　LVM：Semi-Automatic　　HVM：多工位自動化系統

圖 21　封裝級測試機台三個階段。左（原文 Fig.45）：「Validation System」，龍門架式機台，花崗岩平台上有多組定位器與燈塔；輸入 SMU、RF Generator，輸出 OPM、OSA、**BERT**（誤碼率測試儀在封裝級首次出現），受測物畫成一個封裝件。中（原文 Fig.46）：「Semi-Automatic Probe System」，同型龍門架機台，儀器相同。右（原文 Fig.47）：大型封閉式多工位自動化系統，上方一排螢幕、中央可見多個測試工位。來源：APC CPO 測試程序，2026-10-09。

原文 Table 13　6.1 封裝級 E-PIC Summary Comparison（中文全譯；只有三欄、無 R&D）

面向	Validation	LVM	HVM
樣本數	30–90 個模組	100% CTQ / ORT 抽樣	100% CTQ / 定期 ORT
電性覆蓋	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件
光學覆蓋	完整規格清單、各角落、Δ 限值	CTQ 子集、guard band	最少 CTQ、單一條件
環境覆蓋	正式資格驗證（依標準）	ORT 抽樣計畫	只做定期 ORT
現在可做的環境範圍	完整、正式驗收準則	ORT 樣本（相對於完整）	ORT 樣本（相對於完整）
介面	連接器 / 尾纖＋腳位、自動化	連接器 / 尾纖＋腳位、自動化	連接器 / 尾纖＋腳位、高速自動化
測試時間優先度	中	高	最高
pass/fail 依據	正式限值＋資格驗收準則	guard band 限值	緊 guard band、自動分 bin

Table 13 附註：參數依封裝架構（直調雷射、EML、整合雷射＋外調變器；尾纖 vs 連接器化；氣密 vs 非氣密；單通道 vs 多通道）、波段、NRZ / PAM4 調整。**這是第一個完整環境 / 可靠度資格驗證（Telcordia GR-468、MIL-STD-883 或同等專案標準）既有物理意義、通常也是合約要求的 insertion**；所用標準、樣本數與驗收準則要在 Validation 明確定下，因為它們驅動 LVM / HVM 的 ORT 規劃。**封裝寄生（打線電感、導線架 / 連接器 launch）是封裝才出現的新風險類別，專門影響 RF 輸入回損與眼圖 / TDECQ，要相對 #3 獨立追 Δ，與光纖貼附類光學風險分開**；HTOL 下的雷射閾值漂移仍是承接前站的主要可靠度指標；模組級追溯（連結 #3 與 #4 紀錄）要從最早適用的 insertion 起建立。（目錄寫 6.1.4 Summary 在第 105 頁，正文標 6.1.5、實際在第 119 頁，屬原文編號與頁碼誤植。）

9　附錄：測試設備與參考供應商（原文第 7 章）

文件事實 附錄標題為「Test Infrastructure Hardware & Software」，但全文查證後確認：**它只依電性、光學、環境三類列出每種測試硬體的參考供應商名稱與網址，沒有任何儀器規格、性能要求或軟體內容**。儀器「要求」實際上寫在第 2–6 章各階段的 Test Station 段（見下方 9.1 總表）。附錄是「參考名單」，不是市占或採購名單，且與編輯群、工作組成員高度重疊。

節次	硬體類別	原文列名供應商
7.1 電性		
7.1.1	晶圓探針系統	MPI（旺矽）、ficonTEC
7.1.2	ATE 對接站（ATE Docking Stations）	Advantest、Teradyne
7.1.3 / 7.1.4	DC 探針 / RF 探針	MPI
7.1.5–7.1.9	直流源（原文重複列兩次）、直流表、RF 訊號產生器、示波器	Keysight
7.2 光學		
7.2.1–7.2.3	晶圓 / bar / die 探針系統	MPI、ficonTEC、EXFO
7.2.4	光學探頭（FAU）	PHIX、Focuslight、SENKO、TE Connectivity、Lightmatter
（7.2.4）	光源 OLS（原文亦編 7.2.4）	EXFO、Santec、VIAVI、Quantifi Photonics（Teradyne）、Keysight
—	光功率計 OPM	EXFO、Santec、VIAVI、Quantifi Photonics（Teradyne）、Keysight
—	光譜分析儀 OSA	EXFO、VIAVI、Quantifi Photonics（Teradyne）
—	波長計 WLM	Keysight
—	光頻域反射儀 OFDR	Santec
7.3 環境（原文未說明；依正文各機台「溫控夾頭或外接溫箱」的寫法，解讀為具溫控能力的探針系統）		
7.3.1–7.3.3	晶圓 / bar / die 探針系統	MPI、ficonTEC

原文瑕疵：電性節 7.1.5、7.1.6 都寫「DC Sources — Keysight」（目錄的 7.1.6 是 DC Meters，正文因此整段錯位一格），目錄列有「RF Analyzers」但正文清單沒有這一項，所以 RF 分析儀沒有列名供應商；光學節 7.2.4 重號（FAU 與 OLS 都編 7.2.4），之後 OPM 7.2.5、OSA 7.2.6、WLM 7.2.7、OFDR 7.2.8，比目錄編號（OLS 7.2.5 … OFDR 7.2.9）少一號；OPM 的 Keysight 一行排版錯位到下一列。正文出現、但附錄沒有列名供應商的儀器：BERT、安培計、RF 分析儀、偏振控制器、封裝級測試系統與 handler。工作組成員與附錄都沒有 FormFactor、TEL、致茂、Jenoptik（文件事實；不代表它們不在實際供應鏈中）。

9.1　正文各程序的機台與儀器配置總表（附錄沒寫的「要求」在這裡）

文件事實 下表逐節整理第 2–6 章 Test Station 段寫的機台等級與儀器；「圖」欄為對應原文圖號。所有晶圓、bar、die 級機台都寫「可配溫控夾頭或外接溫箱，實際配置依 DUT 架構」；Validation 起都寫「儀器與配方由軟體控制、資料存檔做元件間交叉相關」，LVM 起多數加「ECO 鏈追溯」「晶圓 loader」「選配 SECS/GEM」。紅字為原文文字與小標 / 圖不一致之處。

程序	R&D	Validation	LVM	HVM
2.1 EIC E–E	手動；DC＋RF 定位器、SMU、RF 產生器（Fig.1）	半自動或全自動；同儀器（Fig.2）	全自動＋晶圓 loader＋選配 SECS/GEM（Fig.3）	全自動＋晶圓 loader，未提 SECS/GEM（Fig.4）
2.2 PIC O–O	手動；1–2 光學定位器、OLS、OPM、OSA，選配 OFDR、λ meter（Fig.5）	半自動或全自動；同 R&D（Fig.6）	全自動；OLS、OPM、OSA，選配 OFDR（Fig.7）	全自動；OLS、OPM（Fig.8）
3.1 #2 O–O	手動＋6 軸奈米定位器主動光纖對位、DC/RF 探針卡或探針、2 光學定位器、O/C-band OLS、OPM、偏振控制器、高速 BERT / PAM4 源表、OSA，選配 OFDR、λ meter（Fig.9）	半自動或全自動；1–2 光學定位器、OLS、OPM、OSA，選配 OFDR、λ meter；**未列 DC/RF**；**Fig.10 圖說誤寫 R&D Manual**	全自動；OLS、OPM、OSA，選配 OFDR（Fig.11）	全自動；OLS、OPM（Fig.12）
3.2 #2 O–E	手動；光 / DC / RF 定位器、OLS、DC meter（SMU）、安培計、示波器（Fig.13）	半自動或全自動；同 R&D（Fig.14，圖內 OLS 誤印 OSL）	**寫「半自動或全自動」**；OLS、SMU、安培計＋晶圓 loader（Fig.15）	**同左**（Fig.16）
3.3 #2 E–O	手動；光 / DC / RF 定位器、OPM、OSA，選配 λ meter、SMU、RF 產生器（Fig.17）	**寫手動**（小標與 Fig.18 為半自動）；同 R&D	**寫手動**＋晶圓 loader＋SECS/GEM；OPM、OSA、SMU、RF（Fig.19 自動）	**寫手動**＋loader＋SECS/GEM；OPM、SMU、RF（Fig.20 自動）
4.1 bar O–O	手動；1–2 光學定位器、OLS、OPM、OSA，選配 OFDR、λ meter，**未列 DC/RF**（Fig.21）	半自動或全自動；同 R&D（Fig.22）	全自動；OLS、OPM、OSA，選配 OFDR；**寫晶圓 loader**（Fig.23：MHU＋ATE 對接站）	全自動；OLS、OPM（Fig.24：MHU＋ATE 對接站）
4.2 bar O–E	手動；光 / DC / RF、OLS、SMU、安培計、示波器（Fig.25）	半自動或全自動；同 R&D（Fig.26）	半自動或全自動；OLS、SMU、安培計＋loader＋SECS/GEM（Fig.27：MHU）	同左（Fig.28：圖面含 ATE 對接站）
4.3 bar E–O	手動；光 / DC / RF、OPM、OSA，選配 λ meter、SMU、RF（Fig.29）	**寫手動**（Fig.30 半自動）	**寫手動**＋loader＋SECS/GEM；OPM、OSA、SMU、RF（Fig.31：MHU）	**寫手動**；OPM、SMU、RF（Fig.32：MHU＋ATE 對接站）
5.1 die O–O	手動；1–2 光學定位器、OLS、OPM、OSA，選配 OFDR、λ meter（Fig.33）	半自動或全自動；同 R&D（Fig.34）	全自動；OLS、OPM、OSA，選配 OFDR（Fig.35：MHU）	全自動；OLS、OPM（Fig.36：MHU＋ATE 對接站）
5.2 die O–E	手動；光 / DC / RF、OLS、SMU、安培計、示波器（Fig.37）	半自動或全自動；同 R&D（Fig.38）	半自動或全自動；OLS、SMU、安培計（Fig.39：MHU）	同左（Fig.40：MHU＋ATE 對接系統）
5.3 die E–O	手動；光 / DC / RF、OPM、OSA，選配 λ meter、SMU、RF（Fig.41）	**寫手動**（Fig.42 半自動）	**寫手動**＋loader＋SECS/GEM；OPM、OSA、SMU、RF（Fig.43：MHU）	**寫手動**；OPM、SMU、RF（Fig.44：MHU＋ATE 對接站）
6.1 封裝	（無 R&D）	量產代表性自動化模組測試組＋完整溫度 / 振動 / 衝擊環境箱；圖示 SMU、RF 產生器→OPM、OSA、BERT（Fig.45 Validation System）	量產模組測試組、鎖定程式版本、ORT 專用環境箱（Fig.46 圖說「Semi-Automatic Probe System」）	全自動模組測試系統＋自動 handler、即時良率 / SPC 儀表板（Fig.47）

解讀 儀器組的規律：O–O 用「光源＋光功率計 / 光譜儀」，O–E 用「光源＋直流表 / 安培計（R&D、Validation 加示波器）」，E–O 用「直流源＋RF 產生器＋光功率計 / 光譜儀」；到 HVM 每一類都只剩最少的一台輸出儀器。bar / die 級的 MHU 與 ATE 對接站只在圖說出現，正文沒有規定。

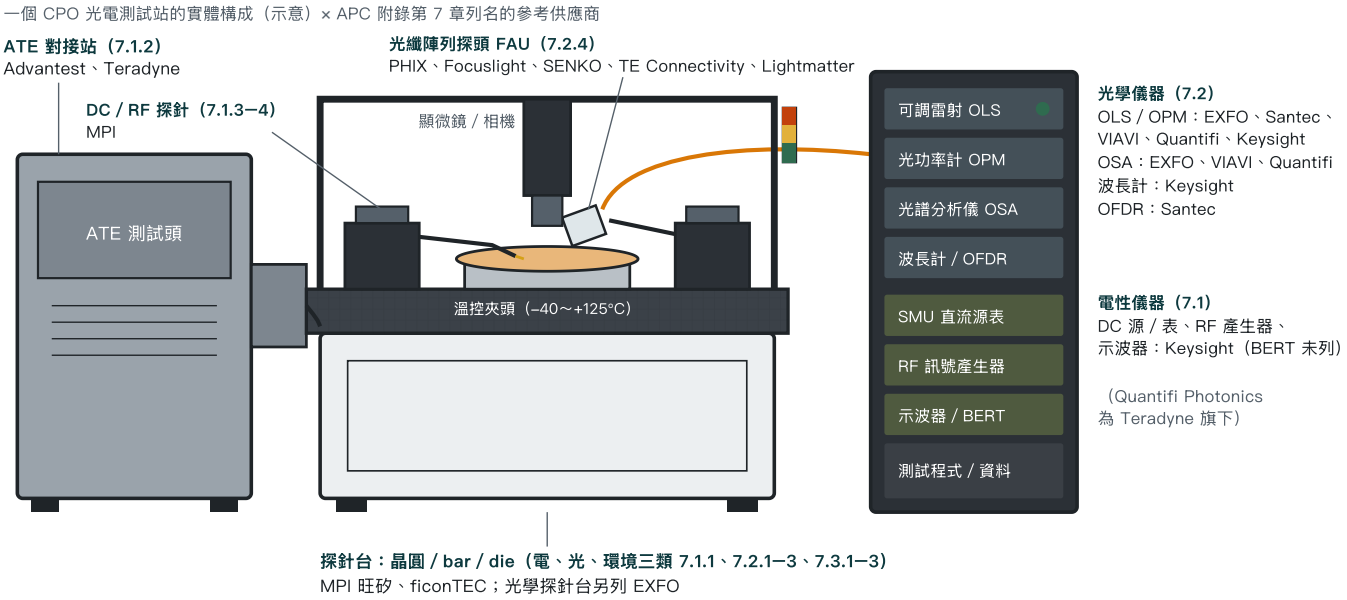


圖 22　把附錄名單放回一個測試站的實體位置（本報告自繪，示意）。中央是探針台（花崗岩平台、溫控夾頭、左右定位器、上方顯微鏡），左側定位器夾 DC / RF 探針、右側夾光纖陣列探頭；左邊是對接過來的 ATE 測試頭，右邊是光學與電性儀器機架。每個位置旁標出 APC 附錄列名的參考供應商。可以看到：探針台與探針集中在 MPI、ficonTEC，ATE 對接只列 Advantest、Teradyne，光學儀器分散在 EXFO、Santec、VIAVI、Quantifi、Keysight 等國際廠。依據：APC CPO 測試程序第 7 章，2026–10–09。

10　跨章節觀察

10.1　從 R&D 到 HVM：測試項目怎麼精簡

文件事實 下表整理 12 套程序在 HVM 階段「100% 必測」與「退到定期抽樣」的項目。

章節	HVM 100% 必測（原文最小 CTQ 集）	HVM 改為定期抽樣
2.1 EIC E–E（#1）	Idd、Ileak、單點功能	ESD、latch-up、溫度 corner
2.2 PIC O–O（#1）	單波長 IL、消光比、粗回損	全波段 WDL、PDL
3.1 E–PIC O–O（#2）	IL、共振波長、消光比、Vπ、粗回損	WDL / PDL、調變頻寬、TDECQ
3.2 E–PIC O–E（#2）	耦合 pass、粗回損、暗電流、響應度、TIA 增益、靈敏度	頻寬、TDECQ、過載、雜訊
3.3 E–PIC E–O（#2）	Idd、S11、輸出功率、中心波長、消光比	完整 L–I、SMSR、TDECQ
4.1 bar O–O（#3）	IL、消光比、端面鍍膜反射率	WDL / PDL、調變頻寬、TDECQ、通道均勻性
4.2 bar O–E（#3）	暗電流（切割完整性）、響應度、TIA 增益、靈敏度	頻寬、TDECQ、過載、雜訊
4.3 bar E–O（#3）	輸出功率、閾值電流（burn-in 篩）、鍍膜反射率、消光比	完整 L–I、SMSR、TDECQ
5.1 die O–O（#3）	IL、消光比、粗回損	WDL / PDL、調變頻寬
5.2 die O–E（#3）	暗電流（切割完整性）、響應度、TIA 增益、靈敏度	頻寬、TDECQ、過載、雜訊
5.3 die E–O（#3）	Idd、S11、輸出功率、中心波長、消光比	完整 L–I、SMSR、TDECQ
6.1 封裝（#4）	Idd、S11、功能介面、輸出功率、中心波長、消光比	完整 L–I、SMSR、TDECQ、全部環境（ORT）

解讀 規律很清楚：**高速類（TDECQ、調變頻寬、眼圖）、全光譜類（WDL、PDL、完整 L–I、SMSR）與環境類在 HVM 一律退到抽樣**；線上只留「功率 / 損耗、波長、消光比、暗電流、增益」這類秒級可量的直流或準直流參數。換句話說，HVM 線上光學測試的核心是「先對準、再讀功率」，高速光電量測集中在 Validation 與 ORT。

10.2　每一站都在跟上一站比

文件事實 每個 insertion 的 R&D 都要以「同一顆 die」對前一站做 Δ（#2 對 #1、#3 對 #2、#4 對 #3），Validation 把它正式化成相關模型，目標是**用前一站資料預測、縮小後一站的測試範圍**。前提是 die 級追溯——文件要求從 R&D 就建成基礎設施；封裝級還要連到組裝批、治具、程式版本、校正狀態。解讀 這讓測試資料系統（追溯、跨站分析、SPC）本身成為流程的一部分，而不是附屬工具（見圖 9）。

10.3　bar 級與 die 級怎麼選

- **由光 I/O 決定**：邊緣耦合要劈裂端面並鍍 AR/HR 膜 → 走 bar 級；光柵或表面耦合不需要端面 → 晶圓直接切成 die。兩者都有時（先 bar 鍍膜再切單），die 級變成更後面的 insertion。
- **各自抓的缺陷不同**：bar 級抓鍍膜反射率與均勻性、burn-in 後閾值偏移、bar 上通道均勻性；die 級抓切割崩邊與碎屑、貼附傾斜與空洞、切割應力造成的雙折射與雷射腔應力、PD 邊緣漏電（見圖 12）。

10.4　「雙面探測」與耦合方式

文件事實 全文**沒有使用「雙面探測」一詞**。#2 的光學存取寫的是溝槽或光柵耦合器搭配單通道光探頭或多通道 FAU 探頭，DC/RF 用探針，沒有規定光從晶圓背面進。解讀 這和部分券商（野村、摩根士丹利、瑞銀）把

Insertion 2 描述為「EIC die 疊在 PIC 晶圓上、上面下電針、下面打光的雙面晶圓測試」不同。APC 的寫法較中性：不管電與光從同一面還是兩面進，都屬於 #2 的範疇。邊緣耦合在 APC 架構中主要出現在 bar 級端面與 die 級邊緣耦合治具。

10.5　環境（溫度）要求

- 溫度範圍：EIC −40° C 到 +125° C；PIC / E-PIC 在晶圓、bar、die 級皆為 −40° C 到 +85° C（或依設計目標），R&D 每 10–20° C 一階；Validation 取三點 pass/fail。
- 晶圓、bar、die 級都**測不到濕度與長時間熱循環**（濕度只當參考），必須到封裝級 #4 才正式做熱循環、濕熱、衝擊振動、HTOL。
- HVM 產線一律不做逐顆環境測試，改季度可靠度抽樣或製程變更時重新認證；熱調係數（pm/° C）與加熱器功耗是光學元件特有的溫度項目。

10.6　ATE 與光學儀器整合的難點（文件點名者）

- **對位是產能瓶頸**：LVM 明寫「auto-align 速度與減少波長點數是主要產能槓桿」；對位方式從手動 → 已驗證 → 鎖定 → 高速 auto-align。
- **量測鏈校正**：靈敏度與過載需要探針平面可追溯光功率基準，且跨 insertion 校正鏈一致；HVM 要定期量參考 die，監控對位、波長準度、光功率校正、探針接觸、RF 路徑與 ATE 漂移。
- **重複性**：每站都要做重新下針 / 重新上料的 Gauge R&R，區分量測雜訊與真實製程偏移。
- **封裝級治具力學**：多光纖對位與上料要監控機械負載、應力消除與光介面位置；治具壽命、插拔次數會影響量測；重測次數設上限、首測結果獨立保存。
- **機台形態演進**：晶圓級是探針台＋儀器；bar / die 級量產改為探針台＋MHU＋ATE 對接站，光學探針台要和電性 ATE 測試頭實體對接（見圖 13、22）。

10.7　對測試時間與成本的影響 推論

測試時間目標從 R&D 的每顆數小時（EIC 可達數天），一路壓到 HVM 的秒級（圖 3）。HVM 秒級目標與「每顆都要先對光」的物理限制之間的落差，就是產能缺口所在；縮短對位時間（多通道 FAU 一次對位、高速 auto-align）比增加量測項目更能決定測試成本。券商與專家場合的數字可作佐證：群益 ECOC 2026 會後分享（2026-10-06）提到 Insertion 3 單機日測約 500 顆；永豐專家分享會（2026-09-21）的專家說法是矽光子測試約占模組總成本 75%（單一專家說法，口徑未明，僅供量級參考）。另外，文件把大量項目從 100% 測改為抽樣，前提是 Validation 證明製程能力與相關性；若良率或相關性不足，抽樣無法放寬，測試時間與機台需求都會上升。

10.8　失效根因分類隨站別一路加項

文件事實 每套程序 Validation 段都要求失效「找根因並歸類」，類別清單隨站別擴張，正好對應每一站新增的製程風險：

程序	Validation 失效歸類（原文列舉）
2.1 EIC（#1）	設計 / 製程 / 測試漏網
2.2 PIC（#1）	設計 / 製程 / 測試漏網 / **對位或治具假象**
3.1–3.3 E-PIC（#2）	設計 / 製程 / **修整或後段步驟**（O-E 為 TIA 修整 / 鍍膜步驟） / 測試漏網 / 對位或治具假象
4.1、4.3 bar（#3）	設計 / 製程 / **鍍膜** / **burn-in** / 測試漏網 / 對位或治具假象
4.2 bar O-E、5.1–5.3 die（#3）	設計 / 製程 / **切割** / **bar 或 die 貼片** / 測試漏網 / 對位或治具假象

6.1 封裝（#4）	設計 / 製程 / **封裝** / 測試漏網（另加可靠度資格驗收準則）

解讀 「對位 / 治具假象」從 PIC 起就是獨立類別，說明光學測試的量測系統本身是主要誤判來源；這也是每站都要求 Gauge R&R、重複下針、參考 die、校正鏈一致的原因。

11 與券商 insertion 口徑的差異

市場上 CPO 測試的「Insertion 1 / 2 / 3 / 4」說法多來自券商，各家定義並不一致。引用 insertion 編號時必須標明出處。

站別	APC（2026-10-09）	券商口徑（野村 2026-07-24、摩根士丹利 2026-10-08、瑞銀 2026-10-08、永豐 2026-09-16）
#1	EIC、PIC 各自晶圓級測試	三家一致
#2	E-PIC 晶圓級，位於一道影響光學性能的後段製程（修整、鈍化、RDL/凸塊、burn-in）之後；**未寫 hybrid bonding、未寫雙面探測**	野村 / 摩根士丹利 / 瑞銀把 #2 定義為 EIC die 疊上 PIC 晶圓後的雙面（上電下光）晶圓測試
#3	分 bar 級（邊緣耦合、端面鍍膜）與 die 級（光柵耦合）兩條路徑；沒有 3.5	野村分 3（die 級）與 3.5（光引擎封裝級）；摩根士丹利為 3 / 3.5
#4	封裝好的 E-PIC 模組（尾纖或連接器化的發射模組），出貨前最後一站；另留未編號「成品」欄給後續版本	三家的 #4 是 ASIC＋光引擎的 CPO 模組 / 系統級測試；摩根士丹利再分 4O / 4E 並提到潛在 #5（系統級測試）。**APC 的 #4 在物理對象上較接近野村的 3.5**
burn-in	列為 #1 與 #2 之間、以及 bar 級 #3 之前可能的中間製程	與永豐提出的「Insertion 1.5 晶圓級 burn-in」概念相容

12　投資意涵 推論，非文件內容

以下為本報告依 APC 文件事實所做的推論。APC 只列「產品類別的參考供應商」，不涉及訂單、市占或客戶認證；文件也沒有數值規格，短期不會改變任何公司的出貨。本節不提供個股排序或買賣建議。

重點	文件事實	推論	相關公司	信心
旺矽站在規則制定位置	MPI 的 Lawrence van der Vegt 任工作組主席；附錄 MPI 列名晶圓 / bar / die 探針系統（電、光、環境三類）、DC 探針、RF 探針	參與標準制定有助產品規格與業界流程對齊、降低客戶導入摩擦；但附錄列名是產品類別描述，不是訂單；各家客戶的 Insertion 2 認證仍是二元變數	旺矽 6223	中
探針台形態升級	機台從手動 → 半自動 → 自動＋loader → 自動＋MHU＋ATE 對接；HVM 目標每顆秒級	每一級是不同單價的設備；bar / die 級量產需要搬運單元與 ATE 對接，單站設備價值提高	旺矽 6223；漢測 7856（ficonTEC 合作夥伴）	中
ATE 雙雄負責對接	附錄 ATE 對接站只列 Advantest、Teradyne	光學探針台與電性 ATE 的整合，延續兩家既有的測試機隊	Advantest 6857.JP、Teradyne TER	中
光學儀器在國際廠	OLS / OPM：EXFO、Santec、VIAVI、Quantifi、Keysight；OSA：EXFO、VIAVI、Quantifi；波長計：Keysight；OFDR：Santec	台廠在光學儀器本體缺席；Teradyne 經 Quantifi 同時涵蓋 ATE 對接與光學儀器	Teradyne TER	中
bar 級常被忽略	APC 為邊緣耦合 / 端面鍍膜流程獨立寫 bar 級 #3 三套程序，HVM CTQ 含鍍膜反射率與雷射閾值	雷射 bar 級光電測試（L–I、閾值、burn-in）與化合物半導體雷射元件測試設備經驗相近	惠特 6706（元件級 LIV 測試機；未見於 APC 名單，連結屬推論）	低
資料追溯是硬需求	跨 insertion die 級追溯、ECO 鏈、首測與終測分開保存、SECS/GEM 接 MES	測試資料分析與良率軟體需求上升	—	中
名單外的公司	FormFactor、TEL、致茂不在工作組與附錄	不能據此推論它們被排除：券商口徑中 FormFactor / TEL 在 Insertion 1、致茂在 Insertion 3 / 4 皆有角色；APC 名單反映的是貢獻者	FormFactor FORM、致茂 2360	名單事實高 / 含意低

投資觀點總結（信心：中）

APC v1.0 把 CPO 測試從「各家客製」往「共同流程骨架」推進，但沒有數值規格。對投資最有用的三點：（1）旺矽以主席身分站在標準制定位置、產品類別覆蓋晶圓到 die 全段，是質性加分，需等客戶認證與訂單驗證；（2）APC 的 insertion 編號與券商口徑不同，尤其 #2（未寫雙面）與 #4（封裝 E–PIC 而非 ASIC＋光引擎），讀任何「Insertion X 設備商」的數字前必須先對齊口徑；（3）HVM 只留直流類參數、高速與環境退到抽樣，測試時間主要由對位決定，對位速度與多通道並測才是設備競爭重點。

13　驗證清單、反證條件與信心水準

13.1　驗證清單

追蹤指標	為什麼重要
APC 後續版本是否給出數值 pass/fail 準則與元件別配置	v1.0 只有框架；有數值後才會實際影響設備規格與採購
APC 是否補上 Finished Product（成品）與 CPO 參考設計	決定 #4 之後（ASIC＋光引擎、系統級測試）是否納入標準
晶圓代工廠 / 封測廠的實際流程是否採用 APC 編號	若業界仍沿用代工廠自訂流程，APC 的影響力有限
旺矽在主要客戶的 Insertion 2 認證結果與訂單	標準參與不等於認證通過，仍是最關鍵的二元變數
bar 級測試在 CPO 光引擎實際被採用的比例	光柵耦合為主流時，bar 級主要適用雷射與邊緣耦合元件
多通道 FAU 並測、高速 auto-align 的實際每顆測試秒數	驗證「對位決定測試成本」的推論；也是探針台高階化的價值來源
APC 是否修正本版的編輯瑕疵（3.3 / 4.3 / 5.3 的 Validation 起機台首句寫手動、4.2 整節是 die 級 O-E 換字、4.3 Scope 照抄 4.2、Table 7–12 部分格子照抄、附錄編號錯位，見附錄 A）	判斷文件成熟度；尤其 bar 級 O-E 是否補寫真正的端面耦合接收端程序；修正後再核對本報告的解讀
APC 是否定義 Granulate / Coarse、MHU，並把 MHU 與 ATE 對接站寫進 Test Station 正文	目前兩者只在圖說出現；寫進正文才算對 bar / die 級量產機台形態有正式要求

13.2　反證條件

1. 主要晶圓代工廠的 CPO 流程不採 APC 框架。
2. 後續版本主席或主要貢獻者更替，MPI 角色淡出。
3. 光柵耦合＋晶圓級篩選大幅取代 bar / die 級測試，#3 的設備需求變小。
4. 多通道並測或被動對位讓對位不再是瓶頸，探針台高階化的價值下降。

13.3　信心水準與假設

- **文件事實：高。**2026-10-22 已將原文全文（2858 行）逐段重讀，章節內容、參數清單、樣本數、溫度範圍、時間量級、12 張 Summary Comparison、附錄名單皆逐節核對。
- **解讀：中高。**全文確認 Granulate / Coarse（只在 Table 1）與 MHU（只在圖說與小標）原文都沒有定義，本報告依上下文推斷；3.3、4.3、5.3 的 Validation 起機台首句、4.2 整節、4.3 Scope、Table 7–12 部分格子確有複製錯誤（逐條見附錄 A），本報告以 Objective、參數清單、小標與圖為準。
- **投資推論：中。**假設 APC 框架會被部分業者採用、對位速度是量產測試主要瓶頸；若上述反證條件成立，推論需下修。
- **待確認**：手動探針台機身「TS300-TZ」是否為 MPI 機型（圖中無廠牌）；工作組成員中的 HYC、Genuine Optics、WUS Printed Circuit 是否為台廠或台廠子公司。

A　原文瑕疵逐條查證（2026-10-22 全文重讀）

上一版報告標註「3.3、4.2、4.3、5.3 機台文字與 Scope 疑似複製錯誤」「Granulate / Coarse、MHU 原文未定義」。本版逐段讀完全文 2858 行後，查證結果如下；「影響」欄說明本報告如何處理。

位置	原文實況	查證	影響與處理
3.3.2—3.3.4（#2 E-O）	Validation、LVM、HVM 的 Test Station 首句都是「Benchtop-style (manual) probe system」，與 R&D 幾乎相同；但小標、Fig.18—20 與同段的晶圓 loader、SECS/GEM 都是半自動 / 全自動	屬實	依小標與圖讀為半自動 / 全自動；儀器清單（OPM、OSA、SMU、RF）可用
4.3.2—4.3.4（bar E-O）	同上，三段機台首句都寫手動；Fig.30—32 為半自動、自動＋MHU、自動＋MHU＋ATE 對接站	屬實（上版未提）	同上
5.3.2—5.3.4（die E-O）	同上，三段機台首句都寫手動；Fig.42—44 為自動化機台	屬實	同上；5.3 的 Scope 本身正確
4.2（bar O-E）Scope	與 5.2 die O-E 的 Scope 逐句相同、只把 die 換成 bar：「Bar-level testing (rather than bar-level)」「不需要劈裂端面、光柵耦合」「從晶圓切割直接到單條 bar、不經 bar 測試步驟」	屬實，且範圍比上版判斷大	4.2 的 R&D 參數也與 5.2.1 相同，沒有任何端面鍍膜或 burn-in 項目；整節應讀為「bar 貼片後的接收端，參數同 die 級」，不是端面耦合 bar 程序
4.3（bar E-O）Scope	與 4.2 Scope 逐字相同，仍寫 Optical-to-Electrical、接收端 PD / TIA	屬實	依 Objective 與參數清單讀為鍍膜 / burn-in 後發射端
3.2（#2 O-E）R&D 小標	寫「3.1.4 High Volume Manufacturing (HVM)」，內容為 R&D	屬實	讀為 3.2.1 R&D
3.2.3—3.2.4、4.2.3—4.2.4、5.2.3—5.2.4（O-E LVM / HVM）	機台文字寫「Semi- or fully automatic」（與 Validation 同句）；3.2 的 LVM / HVM 也沒提 SECS/GEM 與 ECO 鏈	新發現	LVM / HVM 依圖讀為全自動；與其他方向的寫法不一致
3.1.2（#2 O-O Validation）	機台文字沒有 DC/RF 探針；Fig.10 圖說誤寫「3.1.1 R&D-Level – Manual Probe System」	新發現	依摘要表「探針存取：光、DC、RF」讀
4.1.1、5.1.1（bar / die O-O R&D）	機台只列光學定位器與儀器，沒有 DC/RF 定位器，但參數含 Vπ、S21 等電光項目	新發現	依 Scope「DC/RF 偏壓經探針施加」補讀
4.1、4.2、4.3、5.1—5.3 的 LVM / HVM	bar 與 die 級仍寫「A wafer loader enables…」；MHU、ATE 對接站只在圖說出現	新發現	視為沿用晶圓段文字；MHU / ATE 對接站僅能視為圖示配置
Table 7（4.1 bar O-O）	R&D 光學覆蓋「完整 L-I、光譜、眼圖、對 #1 Δ」、電性覆蓋「完整 I-V、S11」、相關性焦點「#1 vs #2」，照抄 Table 6	屬實	表內紅字標示，以正文為準
Table 8（4.2 bar O-E）	光學、電性覆蓋為 E-O 用語；附註整段等於 Table 9（E-O）附註	屬實	表內紅字標示
Table 9（4.3）、Table 10（5.1）、Table 12（5.3）	相關性焦點都寫「邊緣漏電篩選」（接收端用語）；Table 9 電性覆蓋寫「對 #1 Δ」	新發現	表內紅字標示

Table 11（5.2 die O–E）	電性覆蓋寫「完整 I–V、S11 掃描」（發射端用語）	新發現	表內紅字標示
Granulate / Coarse	只出現在 Table 1，正文 2—7 章沒有再提，也沒有定義	屬實	維持解讀：細顆粒逐項量測 vs 粗篩
MHU	只出現在 bar / die 級 LVM、HVM 的圖說與小標，正文從未展開或描述	屬實	維持解讀：探針台旁的物料搬運單元（推測 Material Handling Unit）
節號與目錄	2.1、2.2、3.1、4.1—4.3、5.1、5.2、6.1 標題漏印節號；目錄 4.2 子節誤標 4.1.x、3.2 Summary 誤標 3.1.5、6.1 Summary 目錄 6.1.4 / 正文 6.1.5；目錄頁碼自 Insertion #4 起過時（#4 實際第 111 頁、附錄第 120 頁）	屬實	本報告以正文編號為準
其他筆誤	4.1 Scope「與 bar 級 Insertion #1 一致」；Fig.14 輸入方塊「OSL」；Fig.16、Fig.20 圖說拼字與括號錯；2.2.4、3.1.3 句子截斷；6.1.3 追溯清單重複「模組序號」並以「and etc.」結尾	屬實	不影響參數解讀
附錄第 7 章	只有供應商名稱與網址；7.1.6 重複 DC Sources、缺 RF Analyzers；7.2.4 重號，光學編號比目錄少一號	屬實	見第 9 節

14　出處

- 主要來源：Advanced Photonics Coalition, Test & Measurement Working Group,《Silicon Photonics for Co-Packaged Optics — Recommended Test Procedures》, Version 1.0, © 2026（PDF 建立日 2026-10-09，129 頁）。本報告所有「原文 Fig.」圖片皆取自此文件，圖說為本報告依圖面所見撰寫；Table 2—13 中文表為本報告逐格翻譯，未增刪內容。
- insertion 口徑對照：野村（2026-07-24）、摩根士丹利（2026-10-08）、瑞銀（2026-10-08）、永豐（2026-09-16）之 CPO 測試相關報告。
- 測試產能與成本佐證：群益 ECOC 2026 會後分享（2026-10-06）；永豐智璞專家分享會「矽光子與 CPO 趨勢」（2026-09-21）。
- 一般技術常識（非 APC 數字）：單模光纖外徑 125 μm、纖芯約 9 μm；SOI 矽波導約 0.22 μm 厚；光柵耦合光纖傾角約 8—10°；鍺 PD 響應度約 0.8—1 A/W；FAU 常見 pitch 127 / 250 μm。

本報告為研究整理，不構成投資建議。自繪圖（圖 1、2、3、5、7、9、12、15、20、22）為示意，非實物比例；原文圖片（圖 4、6、8、10、11、13、14、16、17、18、19、21）已標註來源。