

CPO整合加深可靠度驗證難題

既有規範難解CPO驗證缺口

 涂賀仲

矽光子晶片量產元年已在眼前，但業界迄今仍缺乏一套專屬標準，最權威的依據是問世逾廿年的經典規範Telcordia GR-468。面對日新月異的矽光子與CPO技術，這套經典規範是否仍足以承擔可靠度驗證重任？研發者又該如何在標準斷層中，確保產品順利通過Bring-up(系統啟動驗證)考驗並成功量產？

台積電在2026年技術論壇中明確指出，隨著製程邁入2奈米世代，並採用奈米片(Nanosheet)電晶體架構時代，AI算力的延續必須仰賴晶片版三層蛋糕論，所謂晶片版三層蛋糕論，涵蓋運算、異質整合與3D IC，以及最關鍵的光子(Photonics)。誠如台積電高層所言：談到運算能力，電子無可匹敵；但談到訊號傳輸，光子則更勝一籌。

未來資料中心的傳輸勢必由電子轉向光學，而台積電的矽光子先進封裝平台緊湊型通用光子引擎(Compact Universal Photonic Engine, COUPE)也已搭載到基板上，並宣告今年將進入

量產階段。NVIDIA、Intel、Broadcom等大廠也積極布局共同封裝光學(Co-Packaged Optics, CPO)。然而，當光電元件從獨立模組轉向高度整合的晶片封裝時，可靠度驗證的複雜度已不可同日而語。

工程實務上首先面對的問題是：目前有哪些適用規範？實務上，目前業界針對CPO或矽光子產品尚無單一且完全專屬的標準，最權威的依據是經典的Telcordia GR-468。但在高度整合的趨勢下，這套傳統驗證邏輯正迎來前所未有的挑戰。

前文已從矽光子元件組成與效能關鍵切入，探討相關解決方案與量產難關，並針對光子積體電路(PIC)的五大關鍵部件，分析常見故障模式。

本篇將從光通訊規範Telcordia GR-468切入，探討如何由終端系統應用回推至模組、元件與製程層級，並分析矽光子系統進行Bring-up與量產導入時的可靠度驗證方法。

Telcordia GR-468仍適用嗎？

Telcordia GR-468是由Telcordia Technologies(前身為美國貝爾通訊研究公司Bellcore)於2004年發布的核心規範。儘管問世已久，但其嚴謹的測試架構，至今仍是矽光子元件進入AI伺服器供應鏈時，常用的可靠度驗證依據之一。

Telcordia GR-468這項規範的核心價值在於其涵蓋範圍廣泛(圖1)。

涵蓋完整光電鏈

包含雷射二極體(Laser Diode, LD)、光電二極體(Photodiode, PD)、電吸收調變器(Electro-Absorption Modulator, EA Modulator)和LED等相關光電元件。

封裝層級延伸

GR-468依組裝完成度將待測物分為多

個封裝層級(Assembly Level)，測試對象可涵蓋從晶圓、單一晶片，到次模組乃至完整光模組等不同封裝層級。

環境模擬

GR-468規範嚴格區分機房溫控環境(Central Office, CO)與戶外無空調環境(Uncontrolled Environment, UNC)，使驗證條件更貼近實際系統環境，也能納入系統端容易在開發早期低估的風險。

例如，應用於資料中心機房的設備，長期處於溫控環境，溫度與濕度波動小，應力條件相對溫和，驗證重點在於長時間的穩定運作。而隨著AI應用場域擴張，若設備處於戶外或無空調環境，將面臨劇烈的溫度波動、濕熱與高環境應力，極端溫差將嚴苛考驗封裝材質與光學對位的穩定度。

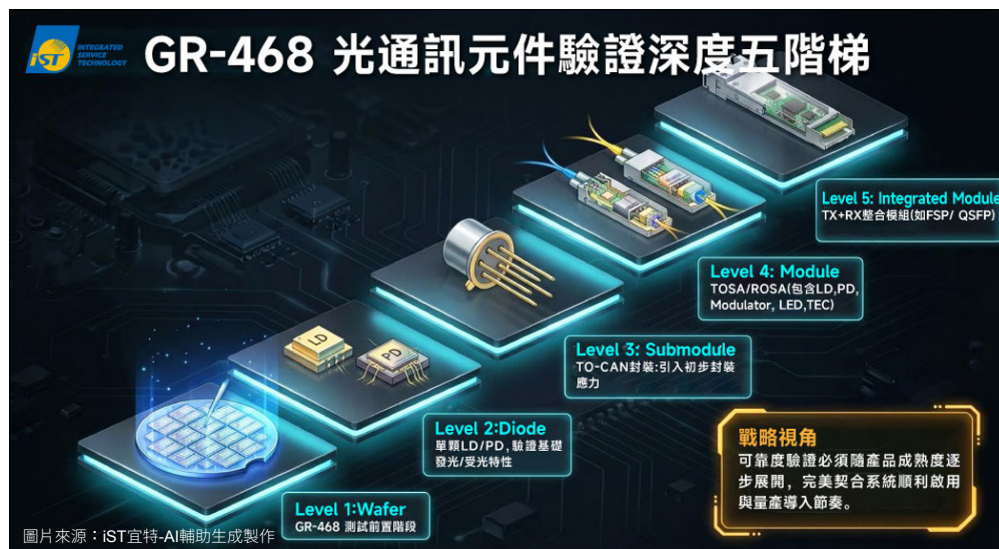


圖1 GR-468規範驗證架構，從晶圓到最終整合模組，涵蓋五個驗證層級

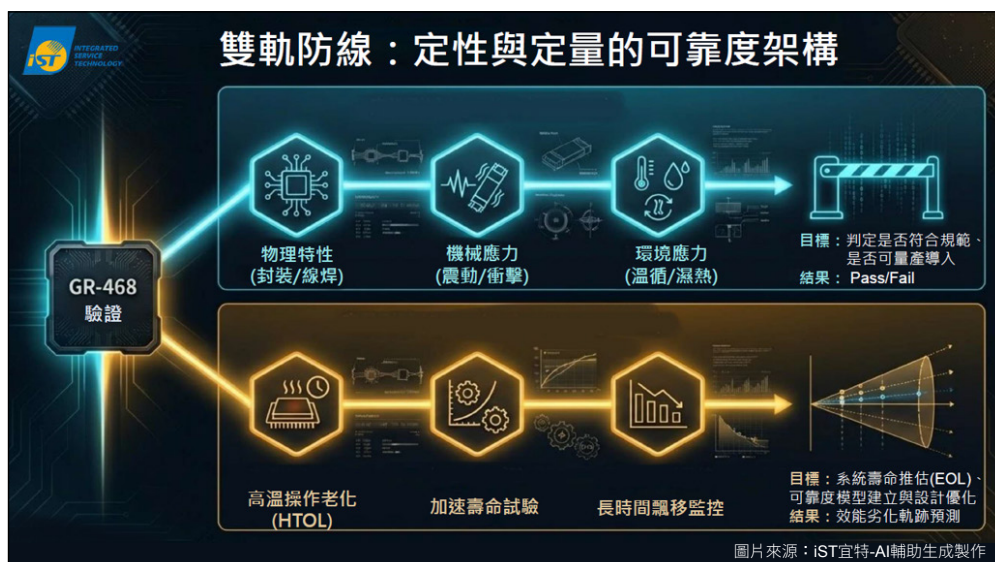


圖2 GR-468兼顧定性與定量測試，可作為量產導入評估依據，並用於系統壽命推估

定性與定量並重

Telcordia GR-468除了可藉由定性測試 (Qualitative Tests) 判別產品是否符合規範，並作為量產導入評估的依據，亦可透過定量測試 (Quantitative Tests/ Aging Tests) 進行壽命終止 (End of Life, EOL) 推估、可靠度模型建立與系統設計優化 (圖2)。

這些Telcordia GR-468的設計，讓可靠度驗證能隨產品成熟度逐步展開，符合矽光子系統bring-up與量產導入節奏。

矽光子元件通過規範，為何系統仍可能失效？

GR-468至今仍具參考價值，但實際應用中，許多完成規範測試的矽光子系統仍無法順利運作。觀察發現，即便產品通過了GR-468規範中的環境應力測試，開發者在系統啟動驗證或長期運作時，

依然會頻繁遭遇非預期的訊號衰減。

這是因為在CPO架構下，光、電、熱、機械四者間的相互作用極其複雜。傳統通過/不通過 (Pass/Fail) 的判定邏輯，已不足以偵測高度整合後產生的深層失效模式。以下是矽光子走向系統整合時，最令工程師頭痛的兩大硬傷：

熱管理挑戰與ELS方案

負責核心運算的GPU屬於高功耗熱源，運作溫度動輒攀升至100°C，這與對熱極度敏感、工作溫度需壓制在70°C以下的光傳輸元件 (雷射光源) 產生了嚴重的熱力學矛盾。雷射光源受熱導致啟動閾值電流指數型增加、波長變長 (紅移)，並加速內部缺陷擴散而縮短壽命。

為了化解這項矛盾，業界傾向將雷射光

源外置(External Laser Source, ELS)。但這衍生了以下風險：

- 高功率操作老化(Aging under High Power)

ELS需以高光功率驅動多個矽光引擎，雷射在極高驅動電流下運作，內部的晶格缺陷會隨時間與高溫擴大，形成暗線缺陷(Dark Line Defects)，導致發光效率劇降。

建議可執行高溫操作壽命測試(High Temperature Operating Life, HTOL)。在85°C或更高溫下持續通電數千小時，觀察光功率衰退曲線，以評估產品是否能滿足10年以上的使用壽命要求。

- 連接介面的脆弱性

ELS增加了連接介面，保偏光纖(Polarization-Maintaining Fiber, PM Fiber)的過度凹折，或是接頭沾染微塵、插拔產生機械微裂紋，都會導致插入損耗高，成為系統潛在的故障點。

異質整合下的熱機械應力(CTE Mismatch，熱膨脹係數不匹配)

矽光子晶片內含矽、三五族化合物、玻璃光纖與金屬，這些材料受熱後的膨脹程度(CTE)差異極大。例如矽晶片(CTE約2.6 ppm/°C)、PCB(約15 ppm/°C)，甚至UV光學膠(約50~100 ppm/°C)之間巨大的應力差，在發熱時會產生劇烈拉扯：

- 次微米級的對位挑戰

光纖陣列(Fiber Array, FA)與矽光晶片耦合時，對位精度要求在次微米級。一旦受熱產生翹曲(Warping)或應力拉扯，輕則光路偏移，重則導致結構剝離(Delamination)。

宜特建議執行溫度循環測試(Temperature Cycling, TC)。在-40°C到+85°C之間劇烈變換，確認光學膠是否產生裂紋，並嚴格監控IL(插入損耗)是否超標，而非僅看元件是否能通電。

- 膠材劣化與水氣滲透：

高溫高濕環境會導致固定用的UV Epoxy(光學膠)發生老化、膨脹或潛變，直接造成訊號損失。

宜特建議可執行溫濕度偏壓測試(Temperature Humidity Bias, THB，即85/85測試)。在85°C、85% RH環境下施加偏壓，持續1,000小時以上，確保膠材在極端環境下的結構完整性。

隨著矽光子與CPO架構的快速發展，可靠度驗證不應只是為了取得測試合格結果，而是要支撐系統長期穩定運作。

目前的Telcordia GR-468規範環境要求，主要分成機房溫控環境(簡稱CO)與戶外無空調環境(簡稱UNC)，隨著故障經驗累積及未來AI運算條件更趨嚴苛現有標準漸顯不足，IPEC協會2025年可靠度執行協議針對光模組納入抗硫化、鹽霧、落塵等更嚴苛的環境測試，供應鏈必須要提前布局，及早做好準備。 

(本文作者為宜特科技資深技術經理)