



經 濟 部

Ministry of Economic Affairs

出國報告（出國類別：訪問）

赴美國拜訪國家標準暨技術研究院 （NIST）馬里蘭州院區，瞭解該國半導體 領域技術與產業發展之最新趨勢出國報告

服務機關：經濟部標準檢驗局

姓名職稱：侯科長沛霖、徐技正智遠

派赴國家：美國馬里蘭州

出國期間：中華民國 114 年 9 月 21 日
至 9 月 29 日

報告日期：114 年 10 月 14 日

摘 要

本次赴美國國家標準與技術研究院（National Institute of Standards and Technology, NIST）及其合作機構參訪，主要聚焦於半導體量測技術、材料純度檢測、標準物質研製及國際合作。隨著該國《晶片與科學法案》(CHIPS and Science Act)通過後，該國已將量測（Metrology）領域技術納入國家科技安全及產業競爭力的戰略層級，而 NIST 在超微量不純物分析、半導體關鍵尺寸非破壞檢測及極紫外光（Extreme Ultraviolet, EUV）光源計量等半導體計量領域，均居於全球領先地位。

在材料與化學計量方面，NIST 分享輝光放電質譜（Glow Discharge Mass Spectrometry, GDMS）及光譜技術，能將固體與氣體的檢測靈敏度推進至兆分之一（ppt）等級，並持續開發高純度材料的參考標準物質(Standard Reference Material, SRM)供產業使用、參考物質辦公室（Office of Reference Materials, ORM）則正積極數位化 SRM 管理，但尚未提供數位校正證書(Digital Calibration Certificate, DCC)服務。在物理與奈米計量方面，NIST 推動石墨烯量子電學標準、低溫電子元件量測、EUV 高次諧波光源（High Harmonic Generation, HHG）及原子級精確製造（Atomically Precise Fabrication, APF），並以同步輻射光源（Synchrotron Ultraviolet Radiation Facility, SURF III）及關鍵尺寸小角度 X 光散射（Critical Dimension Small Angle X-ray Scattering, CDSAXS）技術，支援 EUV 光學元件與閘極環繞電晶體(Gate-All-Around, GAA)結構的非破壞性檢測。

NIST 亦持續發展混合計量（Hybrid Metrology），結合穿透式電子顯微鏡（Transmission Electron Microscopy, TEM）與原子探針斷層掃描（Atom Probe Tomography, APT）同步分析奈米結構，補足單一技術的限制，此研究可作為我國國家度量衡實驗室未來建構跨尺度量測平台規劃目標。

另外，與 NIST 國際合作方面，NIST 國際與學術事務辦公室（International and Academic Affairs Office, IAAO）建議雙方可在氣體與化學參考物質、先進封裝曲度標準及數位孿生（Digital Twin, DT）展開深度合作，並透過人員交流、共同專案與訂定明確里程碑，推進半導體計畫合作落地。

整體而言，此次參訪持續與 NIST 各實驗室探詢合作意向及瞭解研究方向，未來若能深化合作，將有助於鞏固我國在半導體領域國際標準制定與全球供應鏈中的核心地位，並確保產業競爭力持續領先。

目次

內容

壹、前言	5
一、半導體產業量測之需求	5
(一). 超微量污染檢測	5
(二). 先進封裝與 3D 結構量測	5
(三). 奈米材料與新興製程控制	5
(四). 量測數據與模型整合	5
二、國家度量衡標準實驗室對於半導體的定位	6
(一). 建置我國最高等級量測標準	6
(二). 提供各項計量標準品與量測方法	6
(三). 支援先進封裝與新材料	6
(四). 做為我國國際合作橋樑	7
三、本計畫出國目的	7
(一). 瞭解 NIST 半導體量測計畫之最新發展	7
(二). 評估合作契機與互補性	7
(三). 建立技術交流與人才互訪管道	7
(四). 強化我國在國際半導體量測領域之能見度與影響力	8
貳、過程	9
一、本次參訪行程	9
二、主要參訪之詳細內容	13
(一) NIST 概述	13
(二) 參訪實驗室內容	14
(三) 討論內容及結論	16
參、心得及建議	17
一、心得	17

二、建議.....	18
肆、參訪相關照片	19
伍、中英文對照表	21

壹、前言

一、半導體產業量測之需求

隨著全球半導體製程技術不斷推進至奈米甚至奈米以下，並逐步導入 3D 堆疊與異質整合技術，量測與檢測的重要性已從傳統的「品質把關」提升為製程控制與供應鏈信任的關鍵基礎。晶片線寬持續微縮、結構設計日益複雜，即使僅有痕量雜質、奈米級缺陷或細微的應力變化，都可能造成晶片電性異常，進而嚴重影響製程穩定性與產品良率。這使得量測技術不僅是檢查工具，更是確保技術演進與產業競爭力的核心能力。

目前產業界最迫切的量測需求可歸納如下：

(一). 超微量污染檢測

先進製程對氣體、液體與材料純度的要求持續提升，例如在 EUV 光刻與沉積製程中，氧氣、水氣、二氧化碳、金屬離子或奈米粒子等，即使濃度僅在十億分之一（ppb）至兆分之一（ppt）的等級，仍可能造成表面反應異常或晶圓缺陷。為此，需要結合高靈敏度的超微量污染檢測技術（如腔體衰盪光譜 CRDS、輝光放電質譜 GDMS）以及污染溯源方法，以有效掌握並控制污染風險。

(二). 先進封裝與 3D 結構量測

隨著晶圓級封裝（WLP）、矽穿孔（TSV）、晶圓對晶圓（WoW）等異質整合技術逐步量產，封裝的熱應變行為、應力分布與翹曲（Warpage）問題將成為可靠度關鍵。這需要橫跨奈米至毫米尺度的三維量測與模擬驗證技術，並建立如晶圓翹曲標準樣品等國際可追溯的校正工具，才能確保量測結果的一致性。

(三). 奈米材料與新興製程控制

隨著二維材料（如石墨烯）、低介電常數（Low-k）材料、複合奈米材料等新技術逐步導入產業，如何精確掌握其光學、電性與熱傳導特性，並建立可與國際比對之量測標準，已成為新材料整合與應用的關鍵前提。NIST 已規劃並正與全球多個國家計量研究院（NMI）合作，開發相關參考物質與計量方法，協助產業在導入新材料時降低驗證成本，提升技術導入效率與可靠性。

(四). 量測數據與模型整合

隨著 AI 與數位孿生（Digital Twin）在半導體製造中應用愈來愈廣，量測的角色已從「結果驗證」轉變為製程模擬與控制的重要輸入。未來的挑戰不只是量測精度，而是如何建立高可信度的量測資料庫，並透過標準化數據格式支援自動

化與智慧製造，使量測成為「預測」而非「事後檢查」。

二、國家度量衡標準實驗室對於半導體的定位

我國在全球半導體供應鏈中長期扮演關鍵角色，無論是先進晶圓代工、記憶體製程，或是封裝測試領域，都具備舉足輕重的競爭力。然而，隨著先進製程（如 GAA、EUV 製程）與新興封裝技術（如 3D IC、異質整合）快速演進，對量測、校正及標準制定需求已大幅提升。國家度量衡標準實驗室（National Measurement Laboratory, NML）在半導體領域的定位，不僅是提供基礎量測能量，更是我國產業與國際接軌的重要推手。透過強化與 NIST 等國際領先度量衡標準實驗室之合作，期能進一步鞏固我國在全球半導體供應鏈中的核心地位，並確保產業持續創新與發展。綜合各項考量，NML 在我國半導體產業中的角色與任務，其主要工作及定位如下：

(一). 建置我國最高等級量測標準

- 建立符合國際 SI 單位體系的量測標準，確保半導體製程相關檢測數據具備全球一致性與可信度。
- 透過國際比對（International Comparison），並與 NIST、德國物理技術研究院（Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB）等國際領先度量衡標準實驗室合作，維持我國量測能量國際公信力。

(二). 提供各項計量標準品/件與量測方法

- 開發產業亟需的各類參考物質與標準品/件，例如超高純度氣體雜質檢測標準、晶圓翹曲參考標準件、奈米粒徑分布標準品等。
- 同時制定與國際規範接軌的量測方法，協助業界加速導入先進製程，並降低跨廠與跨國間量測數據不一致的風險。

(三). 支援先進封裝與新材料

- 因應 3D IC、晶圓級封裝（WLP）、矽穿孔（TSV）等先進技術的發展需求，推動熱變形行為、應力分布與翹曲量測技術之研究。
- 同時支援新興材料（如石墨烯、二維材料、低介電常數材料）之量測技術，確保產業在導入過程中具備可靠的驗證工具，降低製程整合風險，提升產品穩定性與良率。

(四). 透過國際組織，發揮我國影響力

- 積極參與國際度量衡標準組織（如 CGPM、VAMAS、APMP），提升我國在國際計量與標準制定之影響力。
- 透過與 NIST、比利時微電子研究中心（Interuniversity Microelectronics Centre, IMEC）、日本產業技術綜合研究所（National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST）等國際機構合作，掌握全球半導體量測趨勢，並推動雙邊或多邊合作機制。

三、本計畫出國目的

本次赴美國國家標準暨技術研究院（National Institute of Standards and Technology, NIST）進行參訪與交流，主要目的如下：

(一). 瞭解 NIST 半導體量測計畫之最新發展

- 透過與 NIST 材料量測實驗室（Material Measurement Laboratory, MML）、物理量測實驗室（Physical Measurement Laboratory, PML）等單位交流，瞭解 NIST 在超微量不純物量測、先進封裝結構量測、奈米尺度材料分析及量子計量技術上的最新研究成果。
- 蒐集 NIST 對於參考物質（Reference Materials, RM）、數位校正證書（Digital Calibration Certificates, DCC）以及 EUV 光學量測平台的發展方向，作為我國半導體量測策略規劃的參考。

(二). 評估兩國合作契機與互補性

- 透過比較 NIST 與我國 NML 現有能量，持續與 NIST 在超高純度氣體分析、GDMS 材料檢測、奈米粒子量測、CDSAXS 結構表徵等領域的研究差異，盤點潛在合作空間。
- 探討透過聯合研究、技術驗證、國際比對與標準制定參與等模式，形成雙方互補機制，提升我國國際量測領域的參與度。

(三). 建立技術交流與人才互訪管道

- 與 MML 及 PML 部門多位科學家直接交流，深入瞭解其在光學散射、基礎設施材料、奈米結構表徵等研究方向。

- 與 MML 及 PML 部門主任討論未來進行研究人員交流、博士後計畫、工作坊與專題研究合作的可能性，建立長期的跨國研發合作網絡。

(四). 強化我國在國際半導體量測領域之能見度與影響力

- 透過與國際與學術事務辦公室（International and Academic Affairs Office, IAAO）的討論，爭取我國積極參與該國國際合作機制，確保在未來半導體量測標準制定中具備話語權。

貳、過程

一、本次參訪行程

本次赴美國國家標準與技術研究院（National Institute of Standards and Technology, NIST）之參訪，主要聚焦於半導體量測相關計畫與實驗室，行程安排如下：

（一）物理量測實驗室（PML, Physical Measurement Laboratory）

PML 是 NIST 核心實驗室之一，專責物理計量、量子標準與光學技術，是推動半導體先進製程與量子科技的重要基礎。本次參訪量子量測部（QMD）展示石墨烯量子電學標準，其優勢是可在較高溫度（4K）下運作，取代傳統需極低溫與昂貴氦-3 的砷化鎵元件，並可望擴展至多值電阻標準，提升計量效率、奈米元件表徵部（NDCD）介紹先進光學計量實驗室，利用極紫外高次諧波（EUV HHG）光源，開發 EUV 光學散射與橢偏量測技術，針對 GAA 等複雜結構進行非破壞性檢測。另展示低溫電子實驗室在控制電路表徵的能力，可提供量子計算所需元件參數；原子級精確製造（APF）則透過 STM 製作單原子電晶體與量子點，展現跨越材料與器件層級的量測方法。

（二）材料量測實驗室（MML, Material Measurement Laboratory）

MML 長期負責材料與化學計量相關研究，是 NIST 內部最多研發半導體量測技術之單位。本次規劃參訪實驗室包括如下：

- 1.無機化學計量組（ICMG），該組將分享 GDMS 技術在塊材雜質分析中的應用，該技術可進行全元素純度檢測，對矽與氮化矽等半導體材料的純度控管具有關鍵重要性。
- 2.參考物質辦公室（ORM）將展示其參考物質管理與數位化策略，包括加速 RM 發布流程與推動數位校正證書（DCC）之應用，以提升全球客戶在量測溯源與使用效率方面的便利性。
- 3.化學科學部（CSD）將介紹其在超高純度氣體中檢測 ppt 等級雜質的量測能力，並展示超純水與製程化學品污染物分析技術，這些成果直接支援 EUV 光刻及先進半導體製程的嚴苛需求。
- 4.材料科學與工程處（MSED）將介紹臨界尺寸小角 X 光散射（CDSAXS）技術於奈米結構檢測的應用，特別針對 GAA 與 3D NAND 結構，提供高可信度且非破壞性的量測解決方案。

(三) 國際與學術事務辦公室 (IAAO, International and Academic Affairs Office)

1. IAAO 為 NIST 對外交流的主要窗口，負責推動國際合作與學術夥伴關係的發展。本次與主任 Magdalena Navarro 的會晤，重點在於探討如何在不涉入政策敏感議題的前提下，推動半導體量測技術的交流與人才培訓合作。
2. IAAO 表示，NIST 將持續依循 CIPM 與 BIPM 架構，透過國際比對實驗維繫全球計量一致性，並積極推動量測標準的國際化發展。對我國而言，IAAO 不僅是與 NIST 建立長期合作的重要橋梁，也有助於我國藉由多邊合作進入國際標準制定的核心圈。
3. 未來若能聚焦於污染檢測、可靠度驗證及非破壞量測等主題，並結合研究人員互訪與聯合比對實驗，將可進一步強化我國在國際量測領域的能見度與影響力，並協助我國半導體產業與全球供應鏈更緊密接軌。

(四) 其他 (工程實驗室、IBBR/CARB 等)

1. 除 PML、MML 與 IAAO 外，本次行程亦涵蓋工程實驗室 (EL) 及跨領域研究中心 IBBR/CARB。
2. 在工程實驗室由 Lipiin Sung 博士主持，介紹其於材料老化與塗層可靠度檢測方面的研究進展，特別聚焦於加速老化模擬與污染釋放量測技術。此類研究對半導體封裝材料的長期可靠度驗證具有高度參考價值，並可作為建立國內相關量測標準的重要依據。
3. 在 IBBR/CARB，則進行了小角與廣角 X 光散射 (SAXS/WAXS) 技術於生物科學研究中的應用交流，涵蓋柔性生物系統與複合結構的奈米尺度分析。雖然此領域與半導體產業之直接關聯性相對有限，但其在奈米結構解析與跨領域量測技術方面的豐富經驗，對我國未來推動跨領域檢測平台的建置與應用具有啟發性。
4. 整體而言，這些單位的研究方法與跨域應用，能有效補強我國在材料老化模擬、可靠度測試及跨技術量測整合方面的能力，並有助於培育相關技術人才，促進我國在量測與材料領域的長期發展。

參訪行程表：

第一天：2025 年 9 月 23 日(星期二) - NIST Gaithersburg 主園區

時間	實驗室/會議名稱(地點)	活動內容	對象(NIST 人員)
9:15 a.m. -10:45 a.m.	NIST Gaithersburg Campus	抵達與歡迎(Arrival and Welcome)	Joe Kline(MML 聚合物製程組計畫主持人)
10:45 a.m.-12:00 a.m.	材料量測實驗室 (MML,	ITRI 簡報(ITRI	Kate Beers (MML 主

	Bldg. 227/A302)	Presentation)	任)，MML 管理團隊
12:40 p.m. - 1:40 p.m.		午餐 (Lunch)	-
1:40 p.m.-3:30 p.m.	無機化學計量組(ICMG, MML, Bldg. 227)	固體中痕量雜質分析 (Trace Impurities in Solids)	Mike Winchester(組長)，John Molloy
3:30 p.m.-5:30 p.m.	參考物質辦公室(ORM, MML, Bldg. 203)	參考物質設施 (Reference Materials Facility)	Steve Choquette (ORM 主任)
5:00 p.m.	NIST Campus	離開 (Departure)	-

第二天：2025 年 9 月 24 日(星期三) - NIST Gaithersburg 主園區

時間	實驗室/會議名稱(地點)	活動內容	對象(NIST 人員)
9:15 a.m. - 10:45 a.m.	物理量測實驗室(PML, Bldg. 217/H107)	ITRI 簡報/討論	James G. Kushmerick (PML 主任) (此時段原為 Magdalena Navarro，依要求調整)
10:45 a.m.-12:00 a.m.	量子量測部(QMD, PML, Bldg. 218/E0014)	量子電學標準(Quantum Electrical Standards)	Albert Rigosi(QMD 副主任)
12:00 p.m. - 1:40 p.m.		午餐 (Lunch)	-
1:40 p.m. - 2:40 p.m.	奈米元件表徵部(NDCD, PML, Bldg. 217/E116)	先進光學計量實驗室 (Advanced Optical Metrology Lab)	Bryan Barnes(計畫主持人)
2:40 p.m. - 3:40p.m.	奈米元件表徵部(NDCD, PML, Bldg. 216/G101)	低溫電子實驗室 (Cryogenic Electronics Lab)	Pragya Shrestha(電氣工程師)
3:40p.m. - 5:00 p.m.	奈米元件表徵部(NDCD, PML, Bldg. 221/A144)	先進材料實驗室 (Advanced Material Lab)	Josh Pomeroy(計畫主持人)
5:00 p.m.	NIST Campus	離開(Departure)	-

第三天：2025 年 9 月 25 日(星期四) - NIST Gaithersburg 主園區

時間	實驗室/會議名稱(地點)	活動內容	對象(NIST 人員)
9:15 a.m. - 9:40 a.m.	化學科學部(CSD, MML, Bldg. 221/A010)	氣體純度計量與標準 (Gas Purity Metrology and Standards)	Jenn Carney(組長)，AJ Fleisher (計畫主持人)
9:45 a.m. - 10:20 a.m.	化學科學部(CSD, MML, Bldg. 221/B331)	溶劑中污染物分析 (Contaminants in	Jimmy Radney(研究化學家)

		Solvents)	
10:30 a.m.-11:00 a.m.	奈米元件表徵部(NDCD, PML, Bldg. 219/A006)	原子級精確製造 (Atomically Precise Fabrication)	Rick Silver(實驗物理學家), Jon Wyrick (實驗物理學家)
11:15 a.m.-12:10 p.m.	感測科學部(SSD, PML, Bldg. 245)	同步加速器紫外線輻射設施(SURF-III)	Stephanie Moffitt(工作科學家/物理學家)
12:15 p.m.- 1:30 p.m.	IAAO 餐敘	午餐 (Lunch)	Magdalena Navarro
1:45 p.m. - 2:20 p.m.	材料量測科學部(MMSD, MML, Bldg. 217/D108)	奈米尺度 3D 表徵 (Nanoscale 3D Characterization)	Mark McLean(組長), Will Osborn, Andy Herzing
2:30 p.m. - 3:00 p.m.	感測科學部(SSD, PML, Bldg. 230/112)	氣體流量校正(Gas Flow Calibrations)	Jodie Pope(機械工程師)
3:10 p.m.	NYSC, Bldg. 101	(Coffee Break)	-
3:30 p.m. - 3:50 p.m.	創新與產業服務辦公室 (IIS, Bldg. 101/A1101)	產業服務討論(Industry Services Discussion)	Eric Lin(IIS 代理副主任)
4:00 p.m. - 4:30 p.m.	工程實驗室(EL, Bldg. 221/A144)	基礎設施材料組 (Infrastructure Materials Group)	Lipiin Sung(物理學家)
4:30 p.m. - 5:00 p.m.	材料科學與工程部(MSED, MML, Bldg. 224/B321)	臨界尺寸小角度 X 光散射(CDSAXS)	Joe Kline(計畫主持人)
5:00 p.m. - 5:30 p.m.	國際與學術事務辦公室 (IAAO, TBD)	與 IAAO 主任討論 (Discussion with IAAO Director)	Magdalena Navarro(IAAO 主任)

第四天：2025 年 9 月 26 日(星期五) - IBBR/CARB 參訪(新增行程)

時間	實驗室/會議名稱(地點)	活動內容	對象(NIST/UMD 人員)
全日	生物科學與生物技術研究所(IBBR) /先進生物技術研究中心(CARB)	SAXS 在生物科學研究中的應用與挑戰(討論柔性生物系統、混合技術整合策略、SAXS/WAXS 儀器)	NIST /IBBR 研究人員

二、主要參訪之詳細內容

(一) NIST 概述

- **成立沿革：**

美國國家標準暨技術研究院前身為「美國國家標準局」(National Bureau of Standards, NBS)，由美國國會於 1901 年 3 月 3 日立法設立，初期主要任務在補強美國當時相較英國、德國等工業強國落後的量測基礎。1988 年改制為 NIST，任務不僅止於提供國家標準，更擴展至技術創新、產業發展與國際合作，是美國政府支持關鍵技術與計量基礎的重要研發機構。
- **人員與規模：**

NIST 在全美設有多個園區與實驗室，核心據點主要位於馬里蘭州 Gaithersburg 與科羅拉多州 Boulder。研究團隊包含約 2,900 名科學家與工程師，另有約 1,800 名行政與技術支援人員，並透過全美超過 350 個合作中心一同發展專業技術。這種跨領域且分布廣泛的組織架構，使 NIST 得以涵蓋從基礎科學到前瞻應用的完整技術鏈。
- **經費概況：**

NIST 2021 財政年度預算約 10.3 億美元，至 2024 年已提升至約 15 億美元，佔美國聯邦總預算比重約 0.02%。此經費主要集中於半導體、量子科技、人工智慧、生技量測及基礎設施韌性等領域，反映出 NIST 在美國科技政策中扮演「關鍵支撐」的角色。
- **核心職能與技術布局**
 1. 建立量測溯源體系
 - 提供超過 1,300 項標準參考物質 (Standard Reference Materials, SRMs)，支援產業與科研實驗的數據一致性。
 - 維持美國 17 個領域各項標準，例如國家時間標準：原子鐘與全球可接收的時間與頻率廣播服務。
 2. 校正與認證服務
 - 透過「國家實驗室認證計畫」(National Voluntary Laboratory Accreditation Program, NVLAP)，提供實驗室能力認證。
 - 支援產業界建立校正平台與提供專業技術輔導，協助提升測試驗證能力。
 3. 研究領域
 - 傳統計量領域：物理測量、化學計量、材料科學與奈米科學。

- 新興應用領域：半導體製程量測（如 EUV 光學計量、3D 奈米結構表徵）、人工智慧輔助檢測、量子計量（如石墨烯電學標準）、生技與醫療量測（如單株抗體參考物質、疫苗載體分析）。

(二) 參訪實驗室內容(詳細內容請參閱附件)

1. 物理量測實驗室（Physical Measurement Laboratory, PML）：
 - 量子量測部（QMD）：展示石墨烯量子電學標準，其優勢是可在較高溫度（4K）下運作，取代傳統需極低溫與昂貴氦-3 的砷化鎵元件，並可望擴展至多值電阻標準，提升計量效率。
 - 奈米元件表徵部（NDCD）：介紹先進光學計量實驗室，利用極紫外高次諧波（EUV HHG）光源，開發 EUV 光學散射與橢偏量測技術，針對 GAA 等複雜結構進行非破壞性檢測。另展示低溫電子實驗室在控制電路表徵的能力，可提供量子計算所需元件參數；原子級精確製造（APF）則透過 STM 製作單原子電晶體與量子點，展現跨越材料與器件層級的量測方法。
 - 這些研究成果與我國在次世代晶圓製程與量子元件量測需求高度契合，可作為我國 NML 與該實驗室合作之方向與目標。

二、材料量測實驗室（Material Measurement Laboratory, MML）

2. MML 長期負責材料與化學計量，是 NIST 最直接支持半導體產業的單位。
 - 無機化學計量組（ICMG）：分享 GDMS 技術於塊材雜質分析的應用，能進行全元素純度檢測，對矽與氮化矽等半導體材料純度控制至關重要。
 - 參考物質辦公室（ORM）：展示其參考物質管理與數位化策略，包括快速發布 RM 與推動數位校正證書（DCC），提升國際客戶使用效率。
 - 化學科學部（CSD）：強調在超高純度氣體中檢測 ppt 等級雜質的能力，並展示超純水與製程化學品污染物分析，這些成果直接對應 EUV 光刻及先進製程需求。
 - 材料科學與工程處（MSED）：則介紹臨界尺寸小角 X 光散射（CDSAXS）應用於奈米結構檢測，尤其針對 GAA 與 3D NAND 結構，提供高可信度的非破壞性分析方法。

MML 的能量與我國在污染檢測、參考物質研製及奈米結構表徵上的需求高度互補。

三、國際與學術事務辦公室（International and Academic Affairs Office,

IAAO)

IAAO 主任與我方交流時，特別指出 NIST 在 CHIPS and Science Act 架構下，已將半導體量測列為國家科技安全與產業競爭力的核心。IAAO 強調，我國如要深化合作，需提出明確的合作藍圖與里程碑，例如晶圓翹曲 (Warp) 參考標準的共同開發，才能獲得雙方政府支持。IAAO 也鼓勵透過雙方研究人員交流、聯合比對及共同標準制定，提升我國在國際半導體量測社群中的能見度。

四、創新與產業服務辦公室 (Innovation & Industry Services Office)

本次拜訪該辦公室係由 **Eric K. Lin** 博士 (現任 NIST 創新與產業服務辦公室代理主任) 接待，林主任表示，隨著 CHIPS and Science Act 的推動，美國已將半導體量測視為國家科技安全的核心，NIST 亦肩負協助國家半導體技術中心 (NSTC) 發展計量研究的任務。討論中特別指出，先進封裝與 3D IC 的熱應力行為、翹曲控制，以及奈米材料的純度與結構量測，已成為全球半導體產業面臨的主要瓶頸。Lin 主任認為，我國在先進製程與封裝技術上具有優勢，若能與 NIST 在標準品研製、污染物檢測及跨尺度量測方法上合作，將能形成高度互補效益。他並建議雙方應優先推動量測標準的國際比對，以及共同開發參考物質與測試平台，確保檢測數據具備跨國一致性。整體而言，這場交流確認了 NIST 與我國在半導體量測的合作潛力，並為未來建立聯合研究及人才交流奠定基礎。

五、其他交流單位與科學家專題討論

除核心實驗室外，本次行程亦涵蓋感測科學部 (SSD)、工程實驗室 (EL)，並安排與多位科學家進行深度交流，以強化技術互動與合作連結。

- **SSD** 展示 SURF-III 同步加速器作為 EUV 可計算光源，廣泛用於 EUV 光學元件檢測，以及超低流量氣體流量校正，對半導體製程的氣體計量標準極具價值。
- **EL 基礎設施材料組** 由 LiPiin Sung 博士主導計畫，專注於材料老化與污染釋放監測，分享加速老化模擬系統 (SPHERE) 應用於封裝材料壽命與潔淨室污染研究。
- 本次行程亦拜訪 **R. Joseph Kline** 博士研究成果，參觀其 CD-SAXS 技術在高縱深比結構量測的突破，建議未來可導入我國晶圓與封裝產線。

(三) 討論內容及結論

本次與 NIST 的交流，聚焦於半導體量測、材料計量與產業合作三大主軸。首先，美方明確指出，隨著《晶片與科學法案》(CHIPS and Science Act)的推動，NIST 已被賦予協助國家半導體技術中心(National Semiconductor Technology Center, NSTC)建構量測研究能力的任務。半導體量測已被視為國家科技安全與供應鏈韌性的基礎，因應先進製程與異質整合的挑戰，NIST 將持續強化跨領域量測方法與標準制定。惟本次參訪因美方政策調整，所有晶片法案相關窗口皆告知無法討論該法案後續合作及未來研究規劃，僅針對半導體量測技術部分與我方進行討論。

在 PML 的討論中，NIST 研究團隊展示其在量子電學標準、奈米元件表徵、先進光學量測與低溫電子等領域的最新成果，特別強調其跨奈米至毫米的多尺度量測方法，對於 3D IC、TSV 與高縱深結構的檢測極具參考價值。我方也關注其在 CD-SAXS 與同步加速器應用上的研究進展，並探討這些量測技術如何導入我國晶圓與封裝產線。PML 組長亦口頭表達非常有意願與 NML 進行更進一步之合作。

材料量測實驗室(Material Measurement Laboratory, MML)則分享其在污染物來源鑑別、化學純度檢測與標準參考物質 (Standard Reference Materials, SRMs)開發方面的經驗。美方特別指出，MML 的成果已廣泛應用於超純化學品、聚合物及奈米粒子量測，有助於產業建立國際一致性的檢測方法。我方認為，這與我國工研院及國家度量衡標準實驗室(NML)在奈米粒子分析與污染控制的技術能力高度互補，雙方未來可共同研發標準品，並建立跨國測試平台。MML 組長亦表達非常有意願與 NML 進行更進一步之合作。

在材料科學與工程處(Materials Science and Engineering Division, MSED Division)的交流中，美方強調其在材料熱機械特性、結構可靠度及封裝翹曲控制的量測方法，能直接對應我國先進封裝產業的需求。我方指出，這部分若能與國內的異質整合與 3D IC 研發能力結合，將有助於建立晶圓級封裝可靠度驗證平台。

本次參訪確認 NIST 在半導體量測領域具備全球領先地位，且與我國在材料科學、污染檢測與可靠度驗證上有高度互補性。未來雙方合作可聚焦於三大方向：(1)共同研發量測方法與標準品，確保國際互通性；(2)建立跨國比對與測試平台，提升我國檢測結果的可信度；(3)推動科研與產業鏈結，將 NIST 的先進量測技術引進國內產線，鞏固我國在全球半導體供應鏈的關鍵地位。

參、心得及建議

此次參訪充分體認到，美國將半導體量測作為維繫產業領先與供應鏈安全的核心策略，NIST 在技術、資源與國際標準制定上均具全球領導地位。對我國而言，唯有積極參與國際合作、強化跨尺度量測能力、加速產業應用與標準品研製，方能在全球半導體供應鏈競合中，持續維持優勢與影響力。以下為本次出國行程之心得與建議：

一、心得

本次赴美國國家標準與技術研究院（NIST）參訪，深刻感受到美國在推動半導體計量及標準化研究的戰略高度與完整布局。隨著《晶片與科學法案》（CHIPS and Science Act）於 2022 年正式通過，美國將半導體視為國家安全與科技自主的核心產業，並透過設立國家半導體技術中心（NSTC）及委託 NIST 執行 CHIPS Metrology Program，進一步強化量測、標準與驗證（Metrology, Standards, Validation, MSV）的能力。此舉顯示，美方已認知到量測不僅是科研與製程研發的基礎，更是保障供應鏈可信度與產業競爭力的關鍵。

在交流過程中 PML、MML Lab Office 以及多位科學家皆強調：隨著製程進入奈米至次奈米世代，傳統的量測手段已無法完全滿足先進製程需求。例如在 3D IC 與異質整合封裝領域，晶片內部熱機械行為、應力分布與材料失效模式，往往難以透過傳統手段進行非破壞性且高精度的檢測。NIST 透過發展 CD-SAXS、USAXS、光學散射與加速老化模擬等方法，逐步建構新一代計量技術。

此次參訪也體會到 NIST 與產業的高度互動。美國並非單純依靠學術界進行基礎研究，而是透過公私協力（Public-Private Partnership, PPP）機制，確保研究成果能夠回饋並實際應用於晶圓廠產線。例如 Kline 博士所開發的 CD-SAXS 已成功導入記憶體晶圓廠進行 3D NAND 結構量測，顯示計量研究與產業應用能緊密銜接，這也是我國可借鏡之處。

對比我國現況，我國工研院與國家度量衡標準實驗室（NML）在奈米粒子檢測、污染控制、材料標準品研製已有相當基礎，但在跨尺度量測平台、非破壞性量測方法、國際標準制定參與等方面仍有進一步強化的空間。此次與 NIST 科學家的互動，讓我方更加理解如何將研究成果與產業需求結合，並凸顯我國在國際量測社群中仍需更積極布局，以提升我國在全球半導體產業鏈的發言權。

二、建議

基於本次參訪成果，提出以下幾點具體建議，供後續推動合作與政策規劃參考：

1. 強化國際合作

建議持續與 NIST 建立合作管道，透過工作坊、雙邊專案及研究人員互訪方式，積極參與國際半導體量測計畫。尤其可針對 3D IC 結構量測、異質整合可靠度檢測、污染控制技術等領域進行合作研究，藉此提升我國在國際標準制定上的能見度與影響力。

2. 建構跨尺度量測平台與標準品研製

可結合 NIST 在同步加速器、CD-SAXS、SPHERE 老化模擬等技術的經驗，與我國同步輻射中心、工研院量測中心合作，建立跨奈米至毫米尺度之量測平台。同時加速標準品（SRMs）之研發，提供我國產業可依循的檢測依據，以確保檢測結果具備國際互通性。

3. 深化產學研合作，推動產線導入

參考 NIST 與美國相關產業之合作模式，建議我國可由經濟部標準檢驗局（BSMI）、NML 及工研院串聯台積電、聯電、日月光等產業夥伴，推動量測技術從實驗室走向產線。此舉不僅能縮短技術轉移時程，也能強化產業對國際客戶的可信度。

4. 強化政策支持與資源投入

美國 CHIPS and Science Act 投入數百億美元資金，NIST 每年研究經費逾 15 億美元（約 4,800 名員工），形成強大推動能量，本次參訪亦發現 NIST 許多實驗室已使用該法案資金採購之新型設備。我國在相關計畫資源上相對有限，建議透過專案計畫或跨部會合作投入資源，確保研究能量與政策需求相互呼應。

5. 培育專業人才，促進雙邊交流

建議持續規劃 NML 人員前往 NIST 進行短期或中長期訪問，並鼓勵我國學研機構邀請 NIST 專家至我國進行技術研習或國際研討會。此舉不僅可促進人才交流，也有助我國持續掌握國際前沿技術，為長期合作奠定穩固基礎。

肆、參訪相關照片



圖 1 臨界尺寸小角度 X 光散射實驗室(CDSAXS)



圖 2 PML 及 MML 實驗室入口處諾貝爾獎得主海報

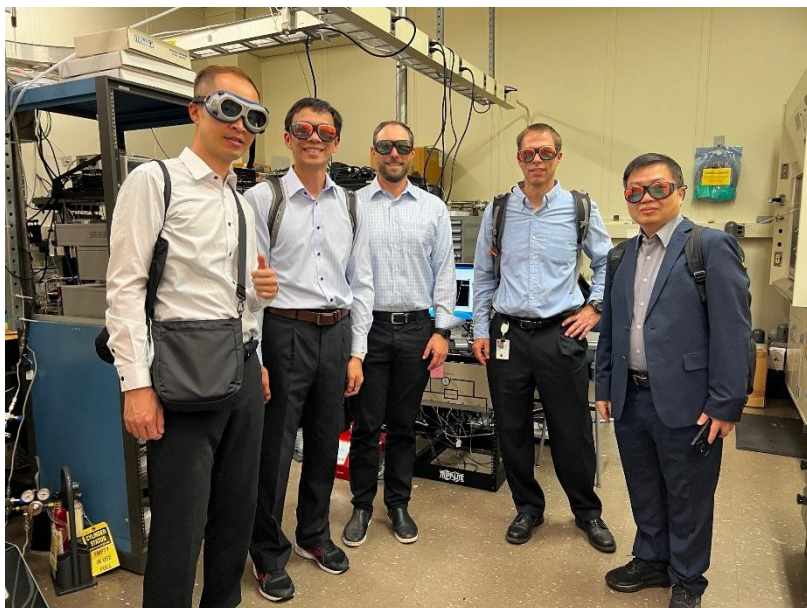


圖 3 氣體純度計量與標準實驗室



圖 4 氣體微流校正實驗室



圖 5 大型及商用加速紫外線老化測試設備



圖 6 SAXS 應用於疫苗等蛋白質結構

伍、中英文對照表

英文縮寫	英文全名	中文名稱
AIST	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	日本產業技術綜合研究所
APF	Atomically Precise Fabrication	原子級精確製造
APT	Atom Probe Tomography	原子探針斷層掃描

BIPM	Bureau International des Poids et Mesures	國際度量衡局
CARB	Center for Advanced Research in Biotechnology	先進生物技術研究中心
CDSAXS	Critical Dimension Small Angle X-ray Scattering	臨界尺寸小角度 X 光散射
CHIPS	CHIPS and Science Act	晶片與科學法案
CIPM	International Committee for Weights and Measures	國際計量委員會
CRDS	Cavity Ring-Down Spectroscopy	腔體衰盪光譜
CSD	Chemical Sciences Division	化學科學部
DCC	Digital Calibration Certificate	數位校正證書
DT	Digital Twin	數位孿生
EL	Engineering Laboratory	工程實驗室
EUV	Extreme Ultraviolet	極紫外光
GAA	Gate-All-Around	全環繞閘極電晶體
GDMS	Glow Discharge Mass Spectrometry	輝光放電質譜
HHG	High Harmonic Generation	高次諧波光源
IAAO	International and Academic Affairs Office	國際與學術事務辦公室
IBBR	Institute for Bioscience and Biotechnology Research	生物科學與生物技術研究所
IC	International Comparison	國際比對
ICMG	Inorganic Chemical Metrology Group	無機化學計量組
IIS	Innovation & Industry Services Office	創新與產業服務辦公室
IMEC	Interuniversity Microelectronics Centre	比利時微電子研究中心
MML	Material Measurement Laboratory	材料量測實驗室
MMSD	Materials Measurement Science Division	材料量測科學部
MSED	Materials Science and Engineering Division	材料科學與工程部
MSV	Metrology, Standards, Validation	量測、標準與驗證
NDCD	NanoDevice Characterization Division	奈米元件表徵部
NBS	National Bureau of Standards	美國國家標準局
NIST	National Institute of Standards and Technology	美國國家標準與技術研究院
NML	National Measurement Laboratory	國家度量衡標準實驗室

NSTC	National Semiconductor Technology Center	國家半導體技術中心
NVLAP	National Voluntary Laboratory Accreditation Program	國家實驗室認證計畫
ORM	Office of Reference Materials	參考物質辦公室
PML	Physical Measurement Laboratory	物理量測實驗室
PPP	Public-Private Partnership	公私協力
QMD	Quantum Measurement Division	量子量測部
RM	Reference Materials	參考物質
SAXS	Small Angle X-ray Scattering	小角度 X 光散射
SRMs	Standard Reference Materials	標準參考物質
SSD	Sensor Science Division	感測科學部
SURF	Synchrotron Ultraviolet Radiation Facility	同步輻射紫外線設施
TEM	Transmission Electron Microscopy	穿透式電子顯微鏡
TSV	Through-Silicon Via	矽穿孔
USAXS	Ultra-Small Angle X-ray Scattering	超小角度 X 光散射
WLP	Wafer Level Packaging	晶圓級封裝
WoW	Wafer-on-Wafer	晶圓對晶圓堆疊
VAMAS	Versailles Project on Advanced Materials and Standards	凡爾賽先進材料與標準計畫

附件

參訪內容摘要

單位	訪問摘要
無機化學計量組	一、Michael Winchester 介紹了 ICMG 小組的研究工作-開發用於高純度固體的微量雜質計量標準與參考物質。這項工作目的是在為半導體產業提供所缺乏的高純度固體(初期將從矽開始)參考物質(Reference Material, RM)，從而協助產業更有效率的量測分析原物料及改善製程控制。 二、該組的核心技術是輝光放電質譜法(Glow Discharge Mass Spectrometry, GD-MS)。GD-MS 的優勢在於能同時分析週期表上大部分元素，偵測極限低至 ppb 等級及以下。GD-MS 屬於體積質量量測技術，因此研究人員正在結合雷射表面蝕刻技術，開發中子活化分析技術進行輔助，以協助建立 GD-MS 元素分析的可追溯性。 三、Michael Winchester 將透過「間接純度分析」(indirect assay)，即量測所有雜質的總量，來確定材料的純度，這樣即使個別雜質的量測不確定度較大，整體純度的不確定度依然可以控制在允許的範圍。他提到，雖然這項工作是 NIST 履行 NMI 職責、建立 SI 可追溯性的重要環節，但價值 170 萬美元的 GD-MS 儀器採購，目前仍因行政審查程序而延遲，尚未到貨。
參考物質辦公室	一、ORM Director Steve Choquette 介紹參考物質辦公室負責管理 NIST 參考物質(SRM)的銷售、流通和行政業務。NIST SRM 營運模式正從傳統耗時(約七年)且昂貴的認證參考物質(CRM)，轉向更快速開發(約兩年)且「符合用途」(fit for purpose)的參考物質(RM)。RM 尤其適用於生醫、食安領域(如單株抗體、食品安全)和臨床應用，這些領域更需要量測一致性(harmonization)的標準參考物質，而非嚴格的 SI 可追溯性。 二、ORM 目前最暢銷的產品包括 Charpy 鋼鐵強度標準(用於支援國防、石油、船舶等產業的鋼鐵拉伸強度量測)以及單株抗體 RM。NIST 正透過開發新的 CHO 細胞株和蛋白，來支援生物相似性(bio-similarity)的驗證，這是製藥業的一大挑戰。

	三、針對我們提出的半導體晶圓翹曲(warp)參考標準件需求，Choquette 表示這是一個絕對可以合作的領域，但涉及實體標準(artifact)而非化學標準，需轉由 PML 的相關專家進一步討論。 四、在數位化轉型方面，ORM 正致力於實現數據透明化，目標是將新發佈的 SRM 原始量測數據、統計分析報告及用於生成結果的程式碼，公開至公共資料庫，作為邁向數位憑證(DCC)的過渡步驟。
國際與學術事務辦公室	國際與學術事務辦公室主任 Magdalena Navarro 感謝了 BSMI / ITRI 訪問團，並討論了未來合作框架和行政事務。 會議重點和討論範圍包括： 一、高階合作與交流 (High-Level Engagement)：討論兩國政府及機構間高層會議的合作方式與未來安排，這類會議有助於促進機構間活動的開展。 二、確定潛在合作領域：NMI 基礎計量技術：除基礎量別外，新興計量例如量子、半導體、AI 機器人、無人機等，均可進一步深化合作。參考物質或參考標準：半導體參考物質 (Reference Materials)，包括氣體和固體，以及成分分析。 三、人才交流(Personnel Exchanges)：討論了將 ITRI 同仁送到 NIST 進行短期(3 到 6 個月或更長)訪問的可能性，國際與學術事務辦公室可以協助促成此類合作，因為這方面的行政流程已相對成熟。 四、災害應變與工程計量：提及 NIST 的工程實驗室(EL)進行的災害應變研究，例如針對瑪麗亞颶風的報告、建築物倒塌的原因分析與研究(類似於針對世貿雙塔倒塌的原因分析與研究)以及地震相關工作。考量我國有類似的天然環境影響，建議 CMS/ITRI 考慮將納入這些議題及發展相關研究，與 NIST 進行合作
量子量測部門	一、QMD 部門的研究重點是量子電量標準。Albert Rigosi 指出，NIST 自 2017 年以來已採用石墨烯作為國家電阻標準的基礎材料，以取代需要昂貴且稀有氦-3 的砷化鎵標準。石墨烯晶片可在溫度 4 Kelvin 下運作，大大簡化了冷卻要求。QMD 的石墨烯材料是在 NIST 內部使用爐子生長(作為原材料)，然後在奈米製造設施(CNST)進行加工製成晶片。 二、該部門的未來研究目標是突破過去 40 年來量子電氣標準只能輸出單一數值的限制，開發能夠輸出多個量子化電阻值的新型石墨烯晶片。雖然他們仍在使用傳統的油浴(oil baths)中

	存放電阻標準件作為校正電阻標準，但最終目標是以單一石墨烯晶片取代電阻標準。 三、Rigosi 提到，QMD 歡迎來自我國長期訪問交流(3 到 6 個月或更長時間)，因為雙方共同合作能加速對量子計量學的理解。
先進光學計量實驗室	一、目標是開發新的實驗室量測方法，包括 EUV 光譜橢偏儀、EUV 繞射儀和 EUV 疊層成像術(EUV Ptychography)。實驗室的研究核心是開發非破壞性光學技術，用於在廣域視場下對次波長奈米特徵進行計量量測，以支援微半導體製造。實驗室的核心設備是極紫外(EUV)高次諧波產生(High-harmonic generation, HHG)光源，目的是在克服傳統 UV 及可見光在複雜幾何結構(如 GAA)量測中的基本限制。Bryan Barnes 解釋，為了最大限度的保留珍貴的 EUV 光子(尤其在 13.5 nm 波長下)，實驗室光學系統採用相對極長的通道設計(約 17 英尺)，避免過多反射鏡組使用(僅四次反射)。 二、目前，該實驗室正與 NIST 的 Sensor Science Division 合作，共同開發世界上第一個 EUV Mueller 矩陣式橢偏儀，並在 SURF-III(小型原子反應設施)驗證原理可行性。目前選擇 EUV 波長(13.5 nm)雖是為了應對 GAA 關鍵尺寸幾何複雜性，但也了解 EUV 主要提供表面量測資訊，對於埋藏結構的穿透能力有限。
低溫電子實驗室	一、低溫電子實驗室的宗旨是開發新的計量學方法，以實現可靠的類比和數位低溫電路，從而支持量子電腦的規模擴展。他們專注於 4 Kelvin 下的電子元件特性研究，將控制電路移至低溫環境，以減少冷卻功率需求。二、實驗室的工作不是製造晶片，而是對來自不同半導體的商用晶片進行電量特性量測。Pragya Shrestha 強調，常規元件在低溫下會發生參數漂移、基板「凍結」並轉變為具有類金屬性質、以及與封裝材料熱膨脹收縮不一致等問題。 三、為分析低溫電量特性，該實驗室的獨特之處在於其客製化、高精度的低溫探測系統，能夠進行高時間解析 (20 ns)的電性量測。這種高速度量測對於觀察和量化低溫下慢速發生的電荷捕獲(Charge Trapping)等缺陷現象至關重要。他們透過提供準確的低溫電性數據，來幫助晶片設計建立更精確的晶片模型，以確保低溫電路能夠同步協調運行數千個量子位元。
先進材料實驗室	一、AML 實驗室致力於先進半導體和量子元件的關鍵材料合成與開發。實驗室配備了超高真空(UHV)系統，用於電子束蒸發、濺射和氧電漿處理。該實驗室其中一項核心創新技術是

	使用即時遮罩(in-situ shadow mask)，在 UHV 環境中完成薄膜沉積和圖案化，實現快速原型製作，從而加速從材料開發到電性量測的回饋循環。二、目前的研究重點是開發極薄(約 1.4 nm)且高品質的氧化鋁薄膜，這些氧化物對於超導量子資訊(Superconducting Quantum Information)中的 Josephson 界面至關重要，因為它們可以減少導致去相干(decoherence)的雙階系統缺陷(Two-Level System defects)。透過調整大氧電漿(優化中性氧原子而非離子)，能製作出比傳統熱氧化法更穩定、缺陷密度更低的介面。實驗室配備的 XPS 設備，可進行微奈米級的化學狀態映射和非破壞性深度分析，且所有量測均在真空下進行，以確保材料界面的原始狀態。
化學科學部門	一、實驗室研究目標是建立雜質圖譜指紋框架，使其可追溯至新的氣體標準、參考物質和文件標準。同時建立量測技術、參考數據和材料，以達成<1 ppb 的微量元素雜質氣體分析精度。 二、實驗室採用客製化儀器，透過腔衰盪光譜法 (CRDS) 等技術，已在超高純度氦氣和氬氣中觀察到 ppt 等級的雜質。客製化腔體雖然佔用空間不到 1 米，但可提供約足夠有效吸收光程長度。
原子級精確製實驗室	一、原子級精確製造實驗室使用掃描穿隧顯微鏡 (STM) 進行原子級光刻，研究流程涉及精確移除氫原子並用磷原子回填，在矽基板上構建單原子電晶體及量子位元。 二、由於單原子缺陷會嚴重影響量子元件性能，實驗室必須開發創新的電性測試方法來驗證結構，團隊正開發 AI 與自動化工具來校準 STM 探針，以確保光刻的原子級精確度。
SURF-III 實驗室	一、SURF III 是美國的同步輻射紫外線設施，也是提供用於 UV 和 EUV 校正的光源，由於其單磁鐵圓形路徑的設計，SURF III 產生的光譜能夠提供低於 1% 的不確定度量測，該設施主要支持 EUV 半導體產業和太空大氣研究。 二、設施中設有六條計量光束線，包括輻射照度、反射率和光學元件壽命測試。其中，Beamline 7 是一個反射率量測設施，能夠量測用於 EUV 光蝕刻的反射鏡，可處理直徑達 42 厘米的樣品。 三、此外，SURF III 的腔體較小，使其能夠透過降低電子束電流來調整同步輻射光強度，以便在適當功率範圍內校正感測器，這是其他大型同步加速器所不具備的優勢。
奈米級三維表徵實驗室	一、材料量測科學部門展示透過結合穿透式電子顯微鏡 (TEM) 斷層掃描和原子探針斷層掃描 (APT) 的混合計量方法，分析複雜的環柵(GAA)結構。

	二、TEM 提供高解析度的幾何三維結構，APT 則提供原子級的化學成分資訊，研究團隊希望開發無 IP 限制的奈米結構參考標準，以便學術界和工業界驗證這些先進的三維量測技術的準確性。
氣體流量校準實驗室	流體計量組介紹半導體氣體流量標準，範圍從 0.01 至 1000 standard cm³/min (sccm)，該標準採用容積法原理，透過優化收集容器的幾何形狀，確保氣體溫度在收集過程中迅速穩定，從而提高低流量量測的準確度，以校正質量流量控制器在毒性或特殊氣體中的性能。
創新與產業服務組	Eric Lin (Acting Associate Director)在會議中與 ITRI/BSMI 訪問團討論了深化雙方合作的機會、美國晶片(CHIPS)計畫的最新變化，以及 NIST 在數位孿生(Digital Twin)領域的倡議。與 Eric Lin 的討論聚焦於深化與我國在半導體計量學方面的合作，議題包括人才交流、新計量方法開發(如 2D 材料分析)以及標準參考物質(SRM)。 一、Eric Lin 建議 ITRI 考慮參與 NIST 推動的數位孿生(Digital Twin)計畫，將計量學數據流(Data Streams)整合到製造數位孿生的主幹中，以加速新製程技術的創新和開發，特別是在後端封裝(back end packaging)方面。針對我國 CMS/ITRI 的建議與潛在合作領域建議下列幾個議題，希望與 NIST 持續合作： (一). 人才交流(Personnel Exchange)：希望有更多 CMS/ITRI 同仁能夠來 NIST 參與專案。 (二). 新方法開發(New Method Development)：業界持續要求新的量測方法來支持半導體製造，例如 2D 材料的特性分析。 (三). 參考物質(Reference Materials, RM/SRM)：業界(尤其是後端封裝/先進封裝)對參考標準的需求非常迫切。 Eric Lin 進一步針對這些議題提供了以下建議： (一). 建立高影響力的里程碑 (High-Impact Milestones)：他強調，與 ITRI/CMS/ITRI 的合作應設定具體且高影響力的里程碑 (milestone)，而不是僅僅追求廣泛的合作，這有助於確保合作獲得我國政府和產業的支持，並證明其價值。他建議選擇一到兩個非常重要的里程碑，使其成為範例，以展示合作的品質和成效。最終的目標是實現突破性優勢(breakthrough advantage)，定義這是最主要的問題所在，透過高解析度的計量學實現具體成果。 (二). 與產業需求掛鉤(Industry Alignment)：合作項目需要有業界的支持，最好是有像 TSMC 這樣的公司表示需要這項成果，並

提供“投資回報率(ROI)”的評估佐證，若沒有具體可參考之公開評估報告，可以試著自己提出內部評估，做為參考。

(三). 半導體計量(Semiconductor Metrology)：NIST 的半導體計量計畫仍在持續進行，Eric Lin 建議 ITRI 可以直接採用 NIST 內部針對半導體計量設定的七大挑戰(seven grand challenges)作為雙方討論的共同語言，並從中挑選感興趣的子項目進行合作。

二、Eric Lin 提到美國 CHIPS R&D 資金機會最近發生的「巨大」變化：

原計畫取消：前政府設定的國家半導體技術中心(NSTC)和大型設施投資(large facility investments)計畫已被取消。

先進封裝計畫變動：先進封裝計畫及其原本規劃的投入資金(NOFO)也被取消。

三、Eric Lin 強烈建議 ITRI 考慮參與 NIST 推動的數位孿生計畫

(一). 數位孿生計畫(Smart USA Digital Twin)的目標是建立一個可互操作的基幹網路(interoperable backbone)，用於整合來自不同操作單元的數位孿生。這是一個製程技術學會(process technology institute)，而非單純用於優化產量(optimizing yield)或提高效率的機構。

(二). 加速創新：數位孿生目的是在加速新製程技術的創新和開發，例如有了沉積反應器或新 EUV 模型的新設計，可以在數位孿生中證明其優勢，降低在實體系統中嘗試新技術的投資風險。

(三). 計量的關鍵作用：

- Eric Lin 認為，新的計量學是加速製程創新的「關鍵點」(sweet spot)。如果新的量測工具能夠提供現有方法無法提供的資訊，並且這些數據可以整合到數位孿生中，那麼這個數位孿生將變得極具價值。
- 他指出，目前數位孿生計畫的大部分需求集中在後端封裝和先進封裝領域。
- NIST 的計量計畫已經在為數位孿生建立數據流(data streams)。他建議 ITRI 可以透過與 Joe Kline 的計量技術專案合作，從後端取得這些數據流的益處。

(四). TSMC 的參與：TSMC 即將簽署加入 Smart 數位孿生計畫，而 IBM 已經加入。Eric Lin 認為這是一個絕佳的合作平台。

(五). 挑戰：數位孿生計畫面臨許多挑戰，例如資料的安全傳輸、數據價值的認定，以及確保其作為開放平台而非可被駭客攻擊的系統。

CDSAXS 技術團隊	聚合物加工組介紹了新一代關鍵尺寸小角 X 光散射（CDSAXS）系統。實驗室正在採購新的軟 X 射線端站，具備自動化樣品更換和高通量量測能力。此系統將用於量測環柵奈米片和 EUV 光阻劑等奈米特徵的精密量測。新系統的開發旨在填補同步輻射設施（ALS）升級期間軟 X 光量測可能出現的空缺，確保量測工作的連續性與精準度。
材料與結構系統部	此部分討論了利用小角度 X 光/中子散射(SAXS/SANS)解析溶液中柔性生物分子（如 RNA 或脂質奈米粒子）之複雜結構，並將散射數據與其他技術（如 NMR、EPR、Cryo-EM）結合，並利用全原子模擬來精確建構模型。此外，提到實驗室利用 SAXS 數據搭配 AI 演算法，對軟物質配方進行自動化探索和最佳化，以提高研發效率。

名片資訊



Magdalena Navarro
Director

International and Academic Affairs Office

100 Bureau Drive, MS 1090, Bldg. 101, Room A200
Gaithersburg, MD 20899-1090
Tel: (301) 975-2130 ■ Fax: (301) 975-3530
Mobile: (240) 274-1317
Email: mnavarro@nist.gov



James G. Kushmerick
Director

Physical Measurement Laboratory

100 Bureau Drive, MS 8400
Gaithersburg, MD 20899-0000
Tel: (301) 975-4200
james.kushmerick@nist.gov



Steven Choquette, Ph.D.
Director
Office of Reference Materials

100 Bureau Drive Stop 2300
Gaithersburg, MD 20899-2300
Tel: (301) 975-3096 ■ Fax: (301) 926-4751
Cell: (202) 568-9751
Email: steven.choquette@nist.gov



Dr. Albert F. Rigosi
Physicist

Quantum Measurement Division

100 Bureau Drive, MS 8171
Gaithersburg, MD 20899-0000
Tel: (301) 975-6572
Email: afr@nist.gov



Adam J. Fleisher, Ph.D.
Research Chemist

Material Measurement Laboratory

100 Bureau Drive Stop 8320
Gaithersburg, MD 20899-8320
Tel: (301) 975-4864
email: adam.fleisher@nist.gov



Jimmy Radney, Ph.D.

Research Chemist
Chemical Sciences Division

Material Measurement Laboratory

100 Bureau Drive, MS 8320
Gaithersburg, MD 20899
Tel: (301) 975-3904
Email: James.Radney@nist.gov



Michael R. Winchester, Ph.D.
Supervisory Research Chemist
Leader, Inorganic Measurement Science Group

Chemical Sciences Division

100 Bureau Drive Stop 8391
Gaithersburg, MD 20899-8391
Tel: (301) 975-3886 ■ Fax: (301) 869-0413
email: mrw@nist.gov



Mark McLean, Ph.D.

Materials Research Engineer
Nanomechanical Properties Group

Office: (301) 975-2021
Cell: (484) 554-6405
Fax: (301) 975-5005
Email: Mark.McLean@nist.gov

100 Bureau Drive, STOP 8370
Gaithersburg, MD 20899
Room 8111, Building 217

8211