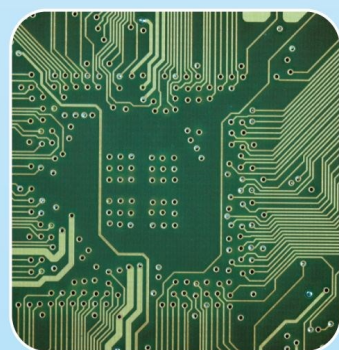


財團
法人

中技社

台灣微機電產業現況及未來發展之挑戰

CTCI FOUNDATION



財團法人中技社(CTCI Foundation)創立於 1959 年 10 月 12 日，以「引進科技新知，培育科技人才，協助國內外經濟建設及增進我國生產事業之生產能力」為宗旨。初期著力於石化廠之設計與監建，1979 年將工程業務外移轉投資成立中鼎工程後，業務轉型朝向裨益產業發展之觸媒研究、污染防治與清潔生產、節能、及環保技術服務與專業諮詢。2006 年本社因應社會環境變遷的需求，在環境與能源業務方面再次轉型為智庫的型態，藉由專題研究、研討會、論壇、座談會等，以及發行相關推廣刊物與科技新知叢書，朝知識創新服務的里程碑邁進，建構資訊交流與政策研議的平台；協助公共政策之規劃研擬，間接促成產業之升級，達成環保節能與經濟繁榮兼籌並顧之目標。

本著創社初衷，為求對我們所處的環境能有更多的貢獻，本社就國內前瞻性與急迫性的能源、環境、產業、社會及經濟等不同議題，邀集國內外專家進行全面的研究探討，為廣為周知，特將各議題研究成果發行專題報告，提供產官學研各界參考。

本專題報告得以出版，要感謝工研院李世光董事長擔任本議題召集人，邀請工研院張培仁副院長、工研院智慧感測與系統科技中心朱俊勳執行長，台大應力所許聿翔副教授，UC Irvine 鄧志強教授(Prof. William C. Tang)，友達光電研發處經理陳昱吉博士，台大應力所李尉彰副教授，及台大電機系暨奈米機電系統研究中心主任林致廷教授等專家學者共同執筆，依篇章順序分別就消費性電子應用，生醫檢測及醫療應用，電動車座艙應用，微機電無線射頻應用，及環安衛檢測應用等，以說明應用典範的方式來研析微機電技術及產業，讓讀者認識微機電系統的運作方式，以及在日常生活、健康醫療、工業產業等各領域的應用，進而了解微機電技術或裝置之無所不在於所有產業應用的重要性及必要性。特聘專家在詳實研析微機電技術及相關產業現況後，在此專題報告中提出客觀、切實的微機電產業發展政策建言，提供政府相關單位參考，極具參考價值。

發行人：潘文炎

主編：陳綠蔚、李世光

作者：張培仁、朱俊勳、許聿翔、鄧志強、陳昱吉、李尉彰、林致廷、黃鎧輝

(依本專題報告之章節順序)

執行編輯：楊顯整、黃鎧輝

發行者：財團法人中技社

地址 / 106 臺北市敦化南路二段 97 號 8 樓

電話 / 886-2-2704-9805

傳真 / 886-2-2705-5044

網址 / www.ctci.org.tw

本社專題報告內容已同步發行於網站中，歡迎下載參考

序

微機電系統(MEMS)的技術發展大概起始於 1960 年前後，約莫與半導體積體電路(IC)的起始發展年代相當。MEMS 不若半導體 IC 較為一般普羅大眾所認知，但是以 MEMS 技術產生的 MEMS 感測器及致動器在現代產業界的重要性則幾乎如同 IC 一樣的不可或缺。微機電系統，包含感測器及致動器等感測、信號回饋及驅動功能推動控制技術的發展，而控制技術的發展更促成方便的人機互動操作，進而讓微機電系統廣泛應用在汽車、消費性電子、工業、醫療保健、電信通訊和航空等各種蓬勃發展的產業中。進一步，在最近廣為各界前瞻關注的，如智慧生活、健康樂活、能源與環境、低碳製造等新興應用領域，微機電系統更是位在樞紐，精準的微機電感測器感測蒐集的數據，更是當前產業智慧化大勢中，人工智慧技術發展的必要依據。由此可見，微機電系統暨技術對促成當前政府正推動的「六大新戰略產業」即資訊及數位、資安卓越、臺灣精準健康、綠電及再生能源、國防及戰略、民生及戰備等六大產業是絕對必要的關鍵技術。

當前微機電產業界在國際上主要是歐、美、日等，如 Robert Bosch, Broadcom, STMicroelectronics, TDK 等相關大廠執技術及市場牛耳。然而，除了此等國際大廠目前極佔優勢的市場及技術領先之外，中國大陸對微機電產業的大力輔助，著實讓台灣微機電產業的發展面對無從迴避的挑戰。

台灣微機電產業關聯的上游，即設計業、中-下游，即製程代工及封裝測試業，及下游，即微機電應用業等的相關產業鏈中，中-下游之製程代工及封裝業者則由於具有優良技術及相當的產業規模，故有其競爭優勢，而下游的相關應用產業，也有微機電系統或技術應用業者，藉由開發出具有市場需求的利基產品，走在前景可觀的營運大道上。然而，台灣微機電產業上游的某些微機電系統設計業者，則由於所開發的微機電產品雖屬市場必要，然，卻有競爭者眾，產品技術及功能必須升級，及生產的數量相對少等情況，故營運上有其艱辛。所以在台灣微機電產業發展上，若能有所

法緊密結合上、中、下游業者，即由下游應用端，就應用所需提出微機電系統的規格需求，由上游設計端據此規格來設計可滿足所需的微機電系統後，再由最富競爭力的中-下游製程及封測端製作完成產品後，行銷市場，此等運作或可是促成台灣當前微機電產業發展的一個可行方式。

當前國際環境下的技術、成本、市場需求等競爭激烈，微機電相關業者著實面對相當的產業競爭壓力，故政府該如何提供最佳的政策、辦法、措施來輔助微機電產業發展，確實有其必要，諸如，如何升級現有的公有微機電技術輔助開發平台至具有最先進的技術設備，以提供微機電相關業者最先進的技術輔導，或是如何對新創微機電企業提供資金以輔助先進的技術及產品的開發與市場經營，讓台灣的微機電業者能在國際上勝出，都是需要政府精闢且具前瞻性的政策規劃與實踐落實。

由於微機電技術對整體產業、社會經濟，及國力的未來如此重要，微機電產業發展及政府政策輔助微機電產業後獲得的成功果實，更需要有系統、有規模、有未來的人力培植來支撐、延展及擴大，讓台灣的產業不僅只有當前執全世界產業牛耳的台積電，更要讓台灣的微機電技術及產業會是世界產業發展寄託的將來。

基於以上對台灣微機電產業發展的認識及期許，中技社以公益法人及非官方立場，規劃並執行本「台灣微機電產業現況及未來發展之挑戰」議題。有幸獲得前經濟部長，現任工研院李世光董事長首肯擔任本議題召集人，並邀請工研院張培仁副院長，工研院智慧感測與系統科技中心朱俊勳執行長，台大應力所許聿翔副教授，UC Irvine 鄧志強教授 (Prof. William C. Tang)，友達光電研發處經理陳昱吉博士，台大應力所李尉彰副教授，及台大電機系暨奈米機電系統研究中心主任林致廷教授等微機電技術產學經驗豐富的專家學者擔任特聘專家研析本議題，並提出專題報告。

在本專題報告中，特聘專家分別就消費性電子應用，生醫檢測及醫療應用，電動車座艙應用，微機電無線射頻應用，及環安衛檢測應用以說明應用典範的方式，讓讀者認識微機電系統的運作方式，微機電系統於日常生活、健康醫療、工業產業等不同領域的各式應用，以及微機電早已無所不在於所有的產業領域的重要現實。另外，中技社在召集人指導下，於消費性電子應用上也整理出一微機電技術於足球運動的應用案例，另跟隨特聘專家的研析過程，拜訪八家微機電業者，彙整出業者的營運意見供特聘專家參考。特聘專家在詳實研析微機電技術及相關產業現況後，在此專題報告中提出客觀、切實微機電產業發展政策建言，恭請政府參閱。

在此對受訪提供見解的上、中、下游相關微機電廠商表達誠摯的謝意。

就召集人及特聘專家群策群力精闢研析微機電技術，產業及相關業者的營運意見，並於本專題報告最終章，對微機電產業界提出詳實明確的發展建議，並對政府相關的產業政策在技術開發、產業發展、人才培育、環境建構及市場開拓等面向，提出實務的建言及作法，以期提振台灣微機電產業發展所盡的寶貴心力，致上最高的謝意。

財團法人中技社 董事長

潘文炎

2023 年 12 月

目錄

序	I
目錄	V
圖目錄	VII
表目錄	XIII
執行摘要	1
一、問題及目標	1
二、研究範圍及內容	1
三、研究結論	3
四、改善對策及建言	3
第一章 微機電系統的介紹	5
第二章 微機電系統之應用典範及新世代	11
一、消費性電子應用	11
(一) 慣性測量單元 (IMU, Inertia Measurement Unit)	11
(二) 麥克風	28
二、生醫檢測及醫療應用	35
(一) 微機電技術在生物檢測及醫療應用於 2000 年後的主要趨勢	35
(二) 微機電技術於生醫檢測及醫療的應用典範產品及技術	37
(三) 結論	56
三、電動車座艙應用	57
(一) 微機電技術於汽車座艙應用之概觀	57
(二) 微機電感測器在汽車座艙中的應用示例	58
(三) 微機電感測器於汽車座艙智慧化的實現	59
(四) 微機電聲學音響感測器 (Acoustic MEMS)	68

(五) 其他 – 關於微形發光二極體 (MicroLED).....	68
四、微機電射頻(RF-MEMS)應用	71
(一) 微機電射頻應用於高頻、寬頻與安全的無線通訊.....	71
(二) 微機電射頻商用晶片的應用典範	73
(三) 微機電射頻關鍵元件的市場規模	82
(四) 微機電射頻關鍵元件的未來趨勢	83
五、環安衛檢測應用.....	86
(一) 微機電化學感測技術	86
(二) 微機電壓力感測技術	100
第三章 微機電產業及其應用市場之拓展	123
一、應用需求.....	123
(一) 傳統應用	123
(二) 新興應用	124
二、技術整合.....	125
三、應用系統及終端產品	127
四、市場，行銷，營收及利潤	130
五、國內、國外之微機電產業競爭	131
六、產業結構.....	134
第四章 結論及建言	137
一、結論.....	137
二、產業發展建議.....	137
三、產業政策建議.....	138
專有名詞中英文及縮寫對照表	141

圖目錄

圖 1.1(A) 微機電系統 – 工研院感測系統中心所開發加速度計之運動感測元件，訊號處理電路，訊號導線及封裝架構實體圖	5
圖 1.1(B) 微機電系統 – 靜電驅動之光學方位可調微鏡片用於反射投射光到指定方向.....	6
圖 1.2 MEMS SOI(SILICON ON INSULATOR) BULK 體型微加工流程示意圖	7
圖 1.3 MEMS SURFACE 面型微加工代表產物	7
圖 1.4 晶片氣密封裝製程流程圖	8
圖 1.5(A) 微機電應用系統示意圖-MEMS 微型投影機	9
圖 1.5(B) 微機電應用系統示意圖-MEMS 氣體感測裝置.....	9
圖 2.1.1 無人機 IMU 應用_六軸 IMU 於運動偵測	11
圖 2.1.2 足球賽場屋頂處配置 12 支攝影機.....	12
圖 2.1.3 球員身上及手腳肢體上配置有 29 個反光點.....	13
圖 2.1.4 足球球心配置有一慣性測量單元(IMU)	13
圖 2.1.5 進攻球員 A，手腳進入越位區	14
圖 2.1.6 進攻球員踢球位置及傳球時間.....	14
圖 2.1.7 工研院首創 IMU 共構(3A3G)創新設計	16
圖 2.1.8 慣性測量單元(IMU)之製作與組裝製程	18
圖 2.1.9 晶圓級微感測器測試系統架構.....	19
圖 2.1.10 微機電加速度計結構示意圖	20
圖 2.1.11 MEMS 加速度計的製程	21
圖 2.1.12 工研院開發之加速度計.....	21
圖 2.1.13 工研院開發之陀螺儀元件電路設計方塊圖.....	22
圖 2.1.14 工研院開發之單軸陀螺儀結構圖.....	23

圖 2.1.15	Z-軸微陀螺儀製作流程	24
圖 2.1.16	2021 年至 2030 年全球感測器市場預測	25
圖 2.1.17	全球慣性感測器產品市場趨勢	26
圖 2.1.18	全球慣性感測器產品廠商市占率	27
圖 2.1.19	(左)噪音來源示意圖 (右)耳機中麥克風與喇叭位置配置示意圖	28
圖 2.1.20	混合式主動降噪的架構示意	29
圖 2.1.21	MEMS 麥克風模組	30
圖 2.1.22	電容式 MEMS 麥克風工作原理	30
圖 2.1.23	工研院的電容式 MEMS 麥克風結構	31
圖 2.1.24	常見的 MEMS 麥克風封裝形式	31
圖 2.1.25	工研院所開發的電容式 MEMS 麥克風	33
圖 2.1.26	工研院電容式 MEMS 麥克風的製程流	33
圖 2.1.27	微機電麥克風在不同應用的出貨量	34
圖 2.1.28	微機電麥克風廠商市場	35
圖 2.2.1	人類基因體序列分析技術成本演變之發展分析圖表	38
圖 2.2.2	ILLUMINA 公司所開發的次世代基因定序裝置(A)，及基因片段樣本庫圖概念圖(B)	39
圖 2.2.3	EMULATE 微生理系統裝置(A)，及基本功能示意圖(B-C)	41
圖 2.2.4	ENLISENSE 穿戴式汗液感測器的設計(A)，感測機制(B)，整體裝置設計(C)，及穿戴方式(D)	44
圖 2.2.5	人工耳蝸助聽器裝置示意圖(A)及產品(B)	46
圖 2.2.6	MEDTRONIC 深部腦刺激(DBS)系統	49
圖 2.2.7	脊髓刺激器	52
圖 2.2.8	MEDTRONIC SYNCHROMED™ II 植入式輸液幫浦	55
圖 2.3.1	友達智慧座艙	59
圖 2.3.2	TOUCH TAIWAN 2023 友達智慧座艙	60

圖 2.3.3	TOUCH TAIWAN 2023 A 柱到 A 柱_55 吋超大型曲面顯示器 ...	61
圖 2.3.4	隱藏式鏡頭.....	62
圖 2.3.5	互動式功能選單.....	62
圖 2.3.6	疲勞駕駛狀態.....	63
圖 2.3.7	駕駛打瞌睡狀態.....	64
圖 2.3.8	分心狀態.....	64
圖 2.3.9	左顧右盼狀態.....	64
圖 2.3.10	乘客閉眼休息或副駕駛座無乘客.....	65
圖 2.3.11	副駕顯示區關閉.....	65
圖 2.3.12	駕駛正視前方，副駕顯示區為一般模式.....	66
圖 2.3.13	駕駛看向副駕顯示區，副駕顯示區為防窺模式.....	66
圖 2.3.14	具影像感測之後座螢幕.....	66
圖 2.3.15	一般亮度狀態.....	67
圖 2.3.16	智慧調光增亮.....	67
圖 2.3.17	陣列揚聲器在遊戲上的立體聲場應用.....	68
圖 2.3.18	透明儀錶 未顯示 / 顯示.....	69
圖 2.3.19	透明儀錶 顯示.....	69
圖 2.3.20	MICROLED 隱形式後座螢幕 / TFT LCD 電競級後座螢幕.....	70
圖 2.3.21	隱形式後座螢幕 未顯示 / 顯示.....	70
圖 2.4.1	5G 與更高速網路的應用場景，包括 (A) 觀看直播 (B) AR 遊戲 與 (C) 全環繞影片觀看體驗.....	72
圖 2.4.2	RF-MEMS 在雲端運算、機器人與自動化、5G 技術與 AR/VR 等領域中皆是關鍵的技術之一.....	72
圖 2.4.3	RF 前端元件的市場複合年成長率.....	73
圖 2.4.4	用於 IPHONE X 的 SiTIME 15XX 系列 32.768 KHz MEMS 振盪器.....	74
圖 2.4.5	EPISEAL 製程步驟.....	75

圖 2.4.6	TI 的 BAW 架構.....	75
圖 2.4.7	TEXAS INSTRUMENTS BAW 振盪器與 VCO 與 ASIC 電路接合俯視圖.....	76
圖 2.4.8	IPHONE 12 PRO MAX 中的 RF-MEMS 濾波器拆解.....	78
圖 2.4.9	QUALCOMM ULTRABAW®技術的元件及濾波效果.....	78
圖 2.4.10	XBAR®技術適用於 5G 及高速 WI-FI 通訊.....	79
圖 2.4.11	XBAR®技術顯現其在 6GHZ WI-FI 頻段的濾波效果.....	79
圖 2.4.12	AKOUSTIS 的 XBAWTM 技術具有相當好的濾波表現.....	80
圖 2.4.13	MENLO MICRO 的開關技術具有極低 (<0.02 DB) 的熱切換 (HOT-SWITCHING) 插入損耗.....	81
圖 2.4.14	RF-MEMS 開關於 5G 天線基礎建設中的應用場景，涵蓋了物聯網的感測器資料傳輸、移動載具定位與資料中心之間的溝通.....	82
圖 2.4.15	RF-MEMS 振盪器逐年的市場份額佔比變化圖.....	83
圖 2.4.16	未來通訊技術將需要更多的天線來滿足多頻段的需求.....	84
圖 2.4.17	現階段濾波技術之比較，SAW 具有低成本的優勢，而 BAW 可應用在高頻頻段.....	85
圖 2.4.18	RF-MEMS 濾波技術將朝更高頻與更寬頻的方向發展.....	85
圖 2.5.1	全球化學感測器市場預估 (2022-2032).....	86
圖 2.5.2	環境汙染物對於健康的影響示意圖.....	87
圖 2.5.3	微機電化學感測機制.....	88
圖 2.5.4	穿戴式微機電化學感測示意圖.....	89
圖 2.5.5	表面聲波感測元件示意圖.....	90
圖 2.5.6	利用奈微米機電技術之光感測技術的發展.....	91
圖 2.5.7	壓電式微機電感測技術材料、應用、市場及相關廠商.....	92
圖 2.5.8	壓電式振動元件各種波傳模式之分類.....	93
圖 2.5.9	利用 LAMB-WAVE MODE 所研發之無線式氣體感測模組.....	94

圖 2.5.10	利用薄膜體聲波諧振腔元件作為二氧化碳感測元件.....	95
圖 2.5.11	利用表面聲波元件與二氧化錫感測材料進行二氧化氮的感測	96
圖 2.5.12	微機電化學感測技術於下一世代的應用發展.....	97
圖 2.5.13	利用三維積體電路架構實現微機電化學感測模組.....	98
圖 2.5.14	次世代低功耗微機電化學感測技術發展策略.....	100
圖 2.5.15	全球微機電壓力感測元件市場預估 (2019-2026).....	101
圖 2.5.16	在車用傳動系統中需要使用微機電式壓力感測元件示意圖..	102
圖 2.5.17	2020 年微機電壓力感測元件廠商於應用市場的佔有率.....	102
圖 2.5.18	現行顱內壓監測醫療器材示意圖.....	105
圖 2.5.19	各新創團隊骨科壓力監測原型示意圖.....	106
圖 2.5.20	利用噴印半導體奈米線所製作的人工皮膚壓力感測研究.....	107
圖 2.5.21	整合點式微機電壓力感測元件於人工觸覺感測示意圖.....	108
圖 2.5.22	利用微柱體結構聚合物作為電容式感測元件之介電層材料研究	110
圖 2.5.23	可撓性電容式微機電壓力感測元件於不同領域的應用範例...111	111
圖 2.5.24	可撓性電容式壓力感測器於生理量測上之應用.....	112
圖 3.1	MEMS 技術應用大趨勢.....	123
圖 3.2	MEMS 感測器的技術與市場加速發展中.....	126
圖 3.3	MEMS 技術之多元應用圖例.....	127
圖 3.4	MEMS 應用市場預測 (2023-2028).....	131
圖 3.5	台灣感測器(含 MEMS)產業結構.....	134

表目錄

表 2.2.1 汗液感測器可監測到的身體健康資訊及種類.....	43
表 2.4.1 BAW 振盪器相較於石英振盪器之比較與優勢.....	76

執行摘要

一、問題及目標

微機電技術無所不在的應用於幾乎所有的產業，就促成產業自動化、自主化及智慧化的進展來看，是如此重要的不可或缺。微機電系統已廣泛的應用在汽車、消費電子、工業、醫療保健、電信通訊和航空等各種蓬勃發展的產業中，而在最近廣為各界前瞻關注的，如智慧生活、健康樂活、能源與環境、低碳製造等新興應用領域中，微機電系統更是位在樞紐，精準微機電感測器感測蒐集的數據，更是當前產業智慧化大勢中，人工智慧技術發展的必要依據。微機電系統暨技術對促成當前政府正推動的「六大新戰略產業」即資訊及數位、資安卓越、臺灣精準健康、綠電及再生能源、國防及戰略、民生及戰備等六大產業而言，是絕對必要的關鍵技術。

微機電系統(MEMS)的技術發展大概起始於 1960 年前後，約莫與半導體積體電路(IC)的起始發展年代相當。美、歐等國大約在 1980 年代開始微機電產業的發展，造就了當前微機電產業界在國際上主要是歐、美、日等，如 R. Bosch, Broadcom, STMicroelectronics, TDK 等相關大廠執技術及市場牛耳的現況。

台灣微機電產業的發展約莫啟始於 1995 年左右，在接近 30 年的發展後，台灣微機電產業現況如何，與歐、美、日等大廠的技術差異為何？微機電技術是否能滿足「六大新戰略產業」的實現，台灣產製的微機電系統產品之技術、功能及價格是否能滿足國、內外之系統應用所需，以及台灣微機電產業該如何運作，可以讓微機電產業如同台灣半導體產業一樣的成功，此等對國家發展來說，是有必要探究了解的，因此，中技社提出台灣微機電產業發展議題的研析，其目的是要探究有利於台灣微機電產業的發展方向及振興微機電產業的方法。

二、研究範圍及內容

(一)微機電技術及產業研析方法：

1. 邀聘專精微機電技術及產業的相關產學專家，以應用典範的方式探討各式微機電技術的應用及最新發展，找出台灣微機電產業最有利的發展方向；
2. 參閱相關產業文獻了解國際上微機電產業、市場現況及發展走向；

3. 訪談台灣相關的微機電廠家，收集廠家對此產業的營運見解及意見；
4. 綜合專家建議的產業發展方向，國際上產業發展走向，國內產業現況及廠家意見，彙整出產業發展建議及提請政府參閱的產業政策建言，並將研析內容、結論及建言，藉專題報告供產官學界參閱。

(二) 微機電技術及產業研析工作：

研析工作包括探究微機電技術之應用典範，撰寫相關內容之專題報告。

1. 特聘專家之專題報告的研析內容：
 - (1) 微機電系統及技術簡介，說明微機電技術相關概念及原理，讓一般讀者對微機電科技有基本認識，也提供國內外當前微機電科技及產業發展現況資訊供具相關微機電專業知識者參考。
 - (2) 研析五大應用典範，包括消費性電子應用，生醫檢測及醫療應用，電動車座艙應用，微機電無線射頻應用，及環安衛檢測應用等。經此研析，理解微機電產業中，必要且關鍵的，如於無人機中必用的慣性測量單元(IMU)相關技術及產品，當前市場份額最大的使用於智慧手機中的微機電無線射頻(RF-MEMS)元件，微機電於醫療健康應用領域中的新興檢測技術及產品，各類微機電系統於自駕車座艙中的應用，及從傳統壓力計進化而適用於自動化檢測或醫療檢測之新世代應用的相關技術及產品等當前國際上的微機電產業的發展趨勢，並依台灣微機電產業技術現況，提出有利於國內微機電產業進展的方向與作法。
2. 本社研究同仁除與召集人及研究團隊研擬專題研究大綱與架構並訪談廠商，收集微機電業者的營運見解及意見；分析微機電廠商運作狀況；議題研析之會議安排，紀錄，特聘專家研析內容彙整，廠商意見彙整，專題報告編輯等。

(三) 台灣微機電產業概況及廠商意見：

1. 產業概況：

台灣微機電產業關聯的上游，即設計業、中游-下游，即製程代工及封裝測試業，及下游，即微機電應用產業等的相關產業鏈中，中-下游之製程代工及封測業者由於具有優良技術及相當的產業規模，故有其競爭優勢，而下游的相關應用產業，也有微機電系統或技術相關應用業者，藉由開發出具有市場需求的利基產品，走在前景可觀的營運大道上。然而，台灣微機電產業上游的某些微機電系統設計業者，則由於所開發的微機電產品雖屬市場必要，然，卻有競爭者眾，產品技術及功能必須升級，及生產的數量相對少等情況，故營運上有其艱辛。

2. 台灣微機電業廠商意見：

- (1) 人才培育及維持；
- (2) 上游設計業產品數量規模小，代工需求少話語權；
- (3) 政府資金輔助發展高階微機電產品；
- (4) 提供滿足微機電中小型廠家所需之製程平台服務；
- (5) 以滿足應用需求來開發微機電產品。

三、研究結論

國內微機電之上、中、下游業者營運條件各有不同，上游設計業者，設計的產品經代工生產後行銷，直接面對市場上的技術及價格競爭，營運資金的消耗及對公有技術平台輔助的期待及需求最多，不能不說營運壓力最大。中-下游的代工封測業者，有相對優良的技術及產業規模，還有競爭優勢。下游的微機電產品開發應用業者，則藉由開發出具有市場需求的利基產品，也有樂觀的營運。

雖然上述產業在不同階段所面對的營運環境有別，然為促成整體微機電產業之全面發展，本研究提出如下客觀務實的產業發展建議及政策建言供政府之產業主管機關參閱。

四、改善對策及建言

(一) 產業發展建議：

1. 政府提供資金支持微機電產業開發先進高階之微機電技術及產品；
2. 政府提供製程平台設備以支持，從 MEMS 創新研發到可試產的專業服務；
3. 透過政策引導企業進行 Fabless IDM 新創公司合作或整併，設立全新並具備最先進技術的廠區；
4. 設立 MEMS 研發中心，MEMS 製造、測試與試產平台，引導產業朝向高值化發展；
5. 台灣 MEMS 上游設計廠家，與國外公司積極技術合作，建立長期合作夥伴關係，以取得與代工業者之合理對談空間；
6. 鼓勵業者切入國際主流廠商已經開始佈局之平台與服務，以此提升產品附加價值。

(二) 政策建言：

1. 基於台灣半導體產業的發展經驗及已具備的半導體產業鏈優勢，集合法人與學界能量，建立一個大規模的產業政策，持續及擴大投入研發

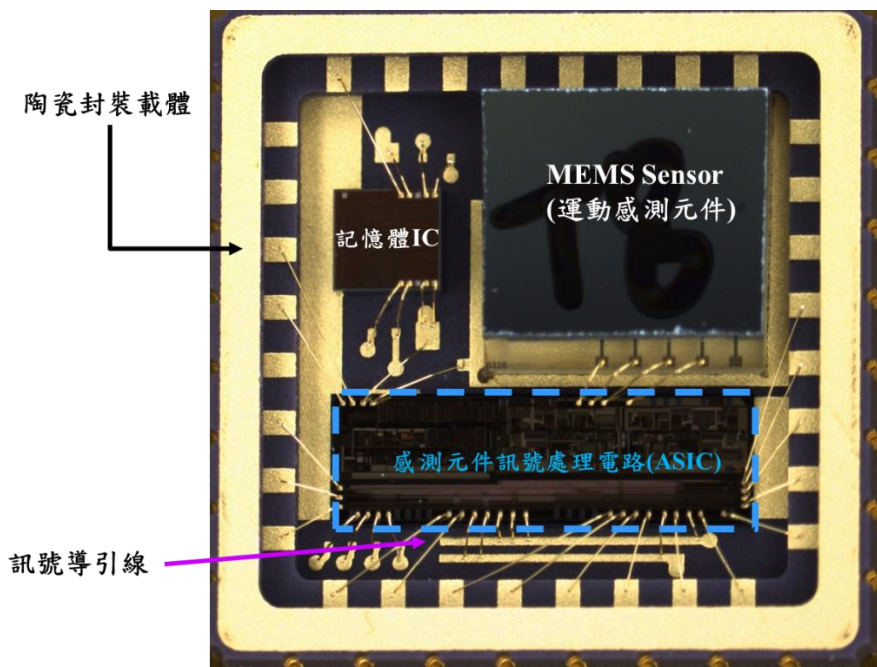
- 資源，並推動輔助企業發展，以促進感知科技產業應用的轉型升級；
2. 基於 MEMS 產業不僅具備高附加價值更是具有剛性需求市場的特性，建議政府提供實質的輔導方法及財務支持以輔助微機電新創公司於建立期間及技術與產品開發期之營運；
 3. 借鏡歐美跨國合作之成功模式與中國當前巨資投入微機電產業發展的 6~12 吋 MEMS 晶片製造平台的作法，建議政府加強提升法人(如，工研院)開發新元件、建立客製化的設計驗證服務能量，以吸引國際新創公司來台下線，並促成人才的交流與培養；
 4. 基於台灣具備先進的半導體製程技術能力與 IC 設計能量，推動異質感測器整合與感測資料融合的開發等新生代技術，建立台灣微機電產業樞紐地位；
 5. 輔助台灣 Fabless 微機電設計新創公司與國際學術研究單位合作，在台灣建構快速試製與驗證基地，打造感測設計、製造與創新應用樞紐重地。

財團法人中技社

第一章 微機電系統的介紹

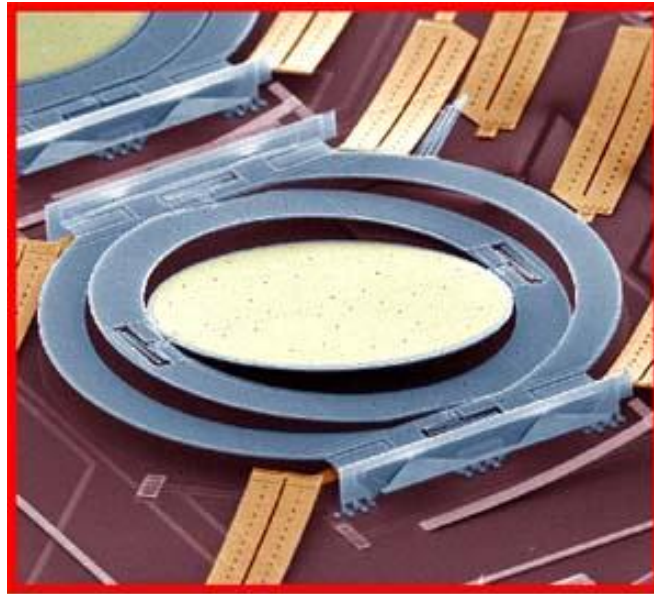
微機電系統(Microelectromechanical Systems, 縮寫為 MEMS)是整合機械功能結構及電子電路製作而成的微型裝置，此裝置上的機械結構可運動，而其電子電路則具可處理電子訊號，其名稱，在日本稱為微機械(Micromachines)，在歐洲稱為微系統技術(MST, Micro Systems Technology)。

MEMS 是利用多種微細加工技術來實現系統中的微小機械結構，且該結構結合相關的電路配置以產生電子訊號或受控操作；此微小機械結構的尺寸是在微米(μm , micron: 10^{-6}m)到毫米(mm, milli: 10^{-3}m)尺度。MEMS 感測器的運作方式是藉反應受測物呈現的特性，如運動、熱、磁或光等物理特性，或是受測物與反應物反應的相關化學特性，或是受測物的生物表現的種種生理特性而將之轉換成對應的電子訊號以及可判讀數據，作為受測物之行為或響應特徵之定性或定量辨識，圖 1.1(A)是一加速度計，反應加速度而產生對應的電子訊號指出加速度的大小。而 MEMS 致動器是一種將能源轉換成機械動能的裝置，該裝置可以控制驅使相關的受控裝置進行各種預定動作，例如 MEMS 致動器可用於定位、控制閥門的開關、或轉動微光學鏡片的角度等，如圖 1.1(B)所示的靜電驅動之光學方位可調微鏡片。



資料來源：工研院 (2023)

圖 1.1(A) 微機電系統 - 工研院感測系統中心所開發加速度計之運動感測元件，訊號處理電路，訊號導引線及封裝架構實體圖

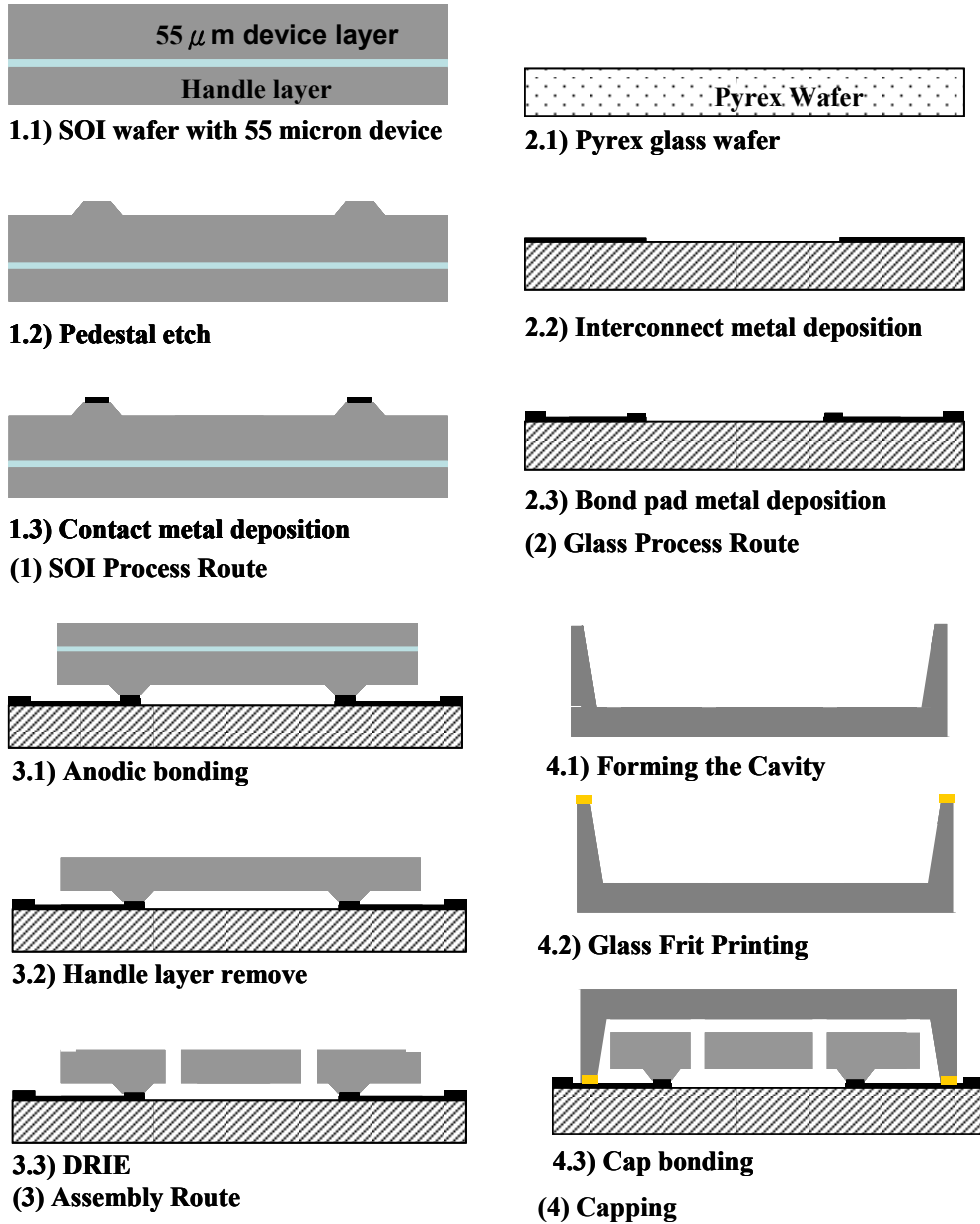


資料來源：<https://www.photonicsonline.com/> (2023)

圖 1.1(B) 微機電系統 - 靜電驅動之光學方位可調微鏡片用於反射投射光到指定方向

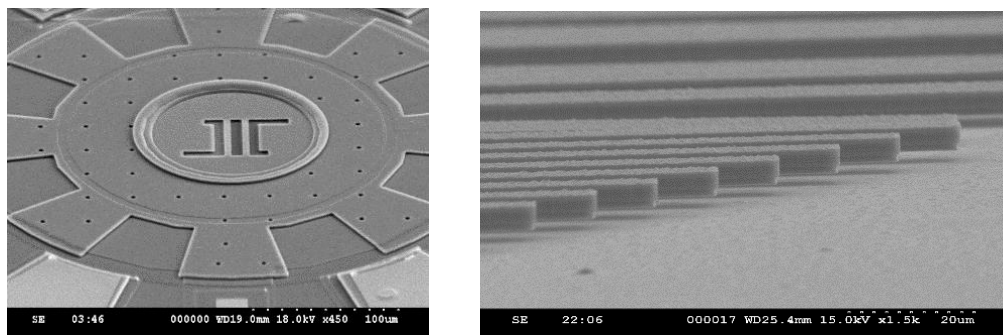
就公尺等級之相對大尺度的機械裝置在一般的環境中的所承受的電磁、靜電、溫度、濕度、大氣壓力及空氣阻力或黏滯力等物理效應對其運動或響應的影響來看，原則上皆可忽略不計。然而，MEMS 微米等級微小結構，上述一般環境中的物理效應，對其運動或響應則都會帶來不可忽視的影響，所以，設計微機電結構時上述物理效應，譬如環境電磁作用，如靜電荷和磁矩，空氣阻力、黏滯力、表面張力和黏度的影響，都需要特別予以考慮如何應對，以確保此等微小結構的物理表現可預期。

經設計的微小結構，需搭配適當的製造技術予以製作，例如體型微加工(Bulk micromachining)技術，如圖 1.2 所示，和面型微加工(Surface micromachining)，如圖 1.3 所示，另外，半導體加工技術，也可以加以改造應用以製作微機電微小機構。除了上述的微機電相關的製程技術之外，還有微米等級的模塑成型(Molding)、鍍層(Plating)、濕式蝕刻(氫氧化鉀，四甲基氫氧化銨等)和乾式蝕刻，如反應離子蝕刻(RIE, Reactive Ion Etching)和深反應離子式蝕刻(DRIE, Deep Reactive Ion Etching)等、放電加工 (EDM, Electrical Discharge Machining)，及其他製造微小型裝置的方法。



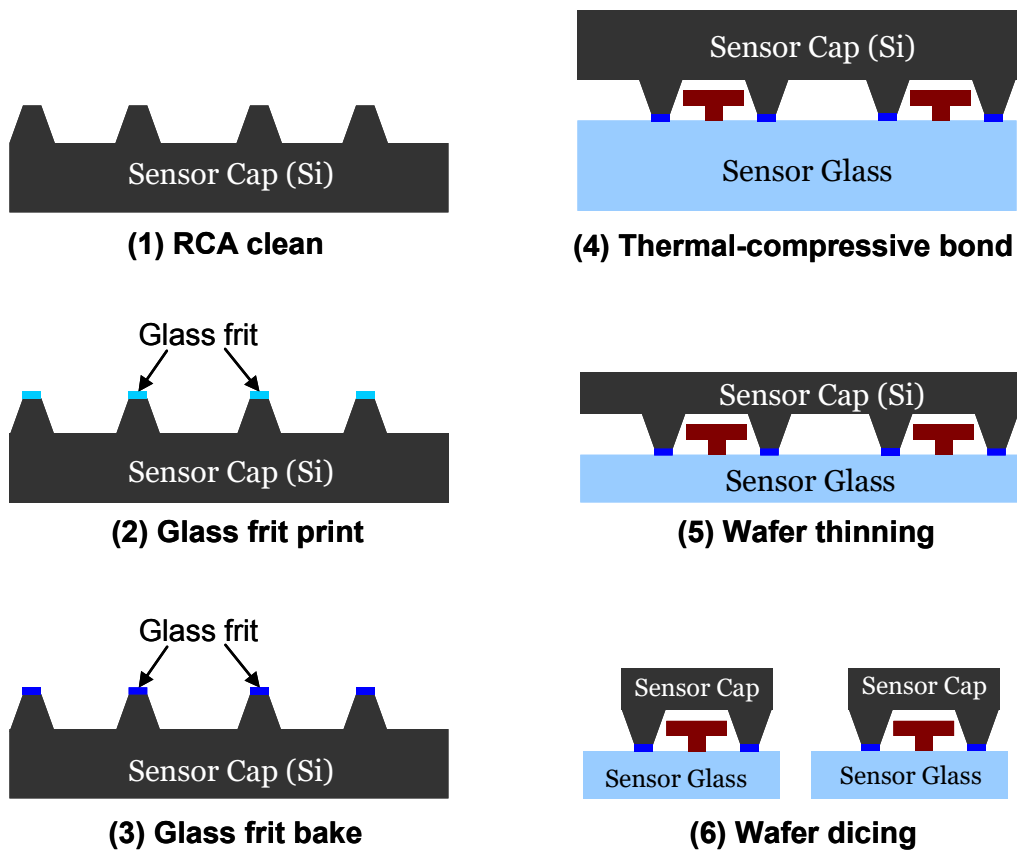
資料來源：工研院 (2023)

圖 1.2 MEMS SOI(Silicon On Insulator) Bulk 體型微加工流程示意圖



資料來源：工研院 (2023)

圖 1.3 MEMS Surface 面型微加工代表產物



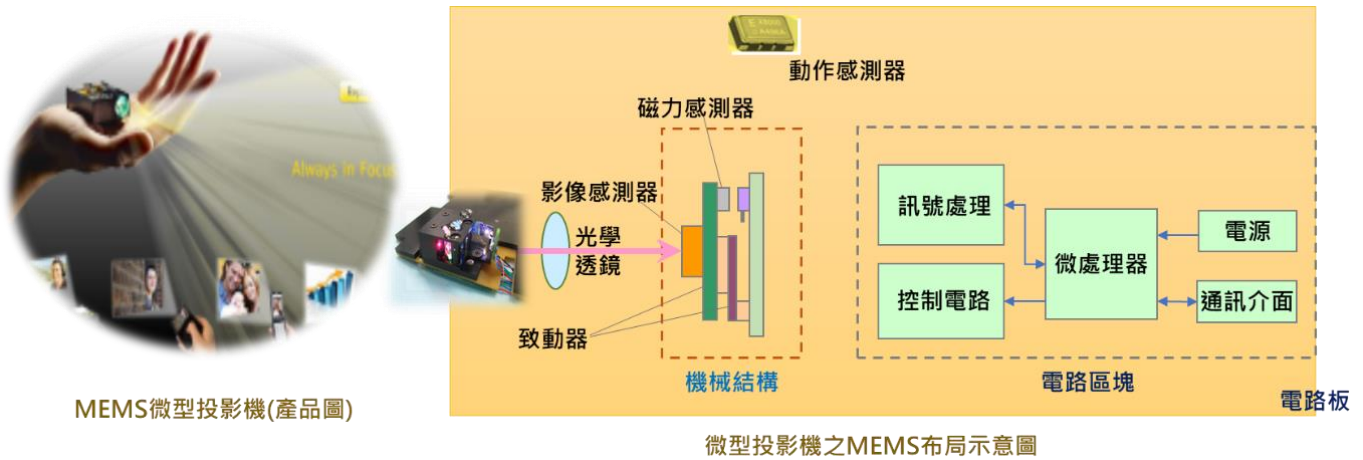
資料來源：工研院 (2023)

圖 1.4 晶片氣密封裝製程流程圖

MEMS 組件可以從固定元件的簡單結構到具有整合微電子控制下的複雜可移動性元件，共通特點是體積小、質量輕、非常低的工作功耗、高度抗振動、抗衝擊和抗輻射等；並且具有優良的響應再現性、準確性、可靠性、選擇性和靈敏度。早期廣泛應用在消費性和汽車電子產品，例如筆記型電腦、導航設備、媒體播放器、數位相機、遊戲機、電子閱讀器和智慧型手機等。此外，電子設備的日益普及是 MEMS 市場增加的主要驅動力，近期由於汽車、消費性電子產品功能升級，加上工業自動化、交通、醫療保健、國防、電信和航空航天等領域之新功能與節電需求，帶動 MEMS 技術整合更多元而助長市場效益，因此 MEMS 技術發展將更形重要。

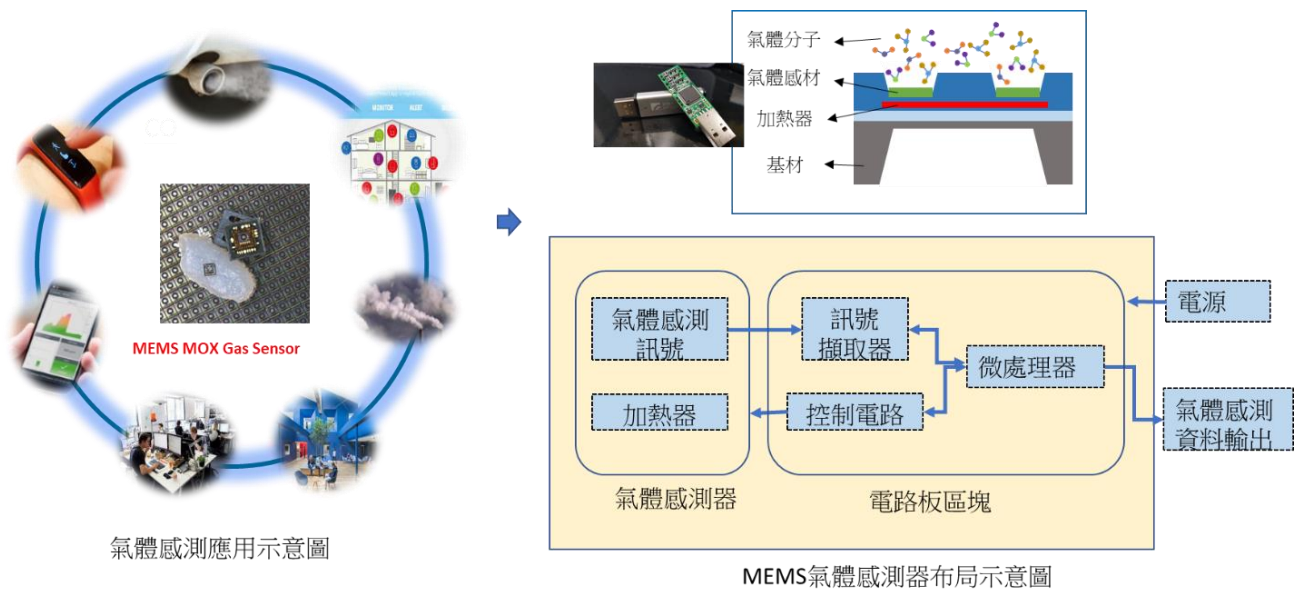
另外，關於 MEMS 應用系統，它可以是由機械微結構、微感測器、微致動器、訊號處理和控制電路、通訊介面等微電子和電源等組件組成的一體化的微型器件應用系統，如圖 1.5(A)所示的 MEMS 微型投影機及圖 1.5(B)所示的 MEMS 氣體感測裝置。此架構組成的目的是把資訊或數據的獲取、處理和執行整合在一起，形成多功能的微型系統，可用來擴充相對大尺寸

應用系統的功能，大幅度地促成系統的自動化及智慧化，並提高可靠性水準。



資料來源：工研院 (2023)

圖 1.5(A) 微機電應用系統示意圖- MEMS 微型投影機



資料來源：工研院 (2023)

圖 1.5(B) 微機電應用系統示意圖- MEMS 氣體感測裝置

由於微機電系統幾乎是無所不在的應用於所有的領域，本專題報告將在消費性電子應用、生醫檢測及醫療應用、電動車座艙應用、無線電通訊應用及環安衛檢測應用等五個領域來介紹相關的微機電應用典範以及其新世代的發展。

第二章 微機電系統之應用典範及新世代

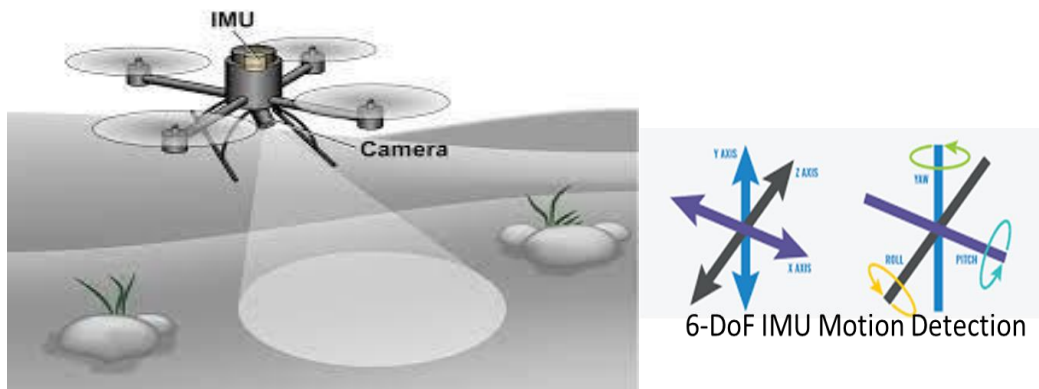
一、消費性電子應用

(一) 慣性測量單元 (IMU, Inertia Measurement Unit)

1. IMU 之應用典範

(1) IMU 於無人機之應用

無人機已是目前熟知的旅行拍攝必備工具之一，但一開始無人機可沒有辦法飛得又穩又順滑，更別說拍出清晰的圖片了。技術更迭至今，無人機在強風及陣風中，也能夠飛的平穩及順滑的秘訣，就是 IMU 賦予無人機的“關鍵核心力量”。



資料來源：Planar-Based Visual Inertial Navigation (2015)

圖 2.1.1 無人機 IMU 應用_六軸 IMU 於運動偵測

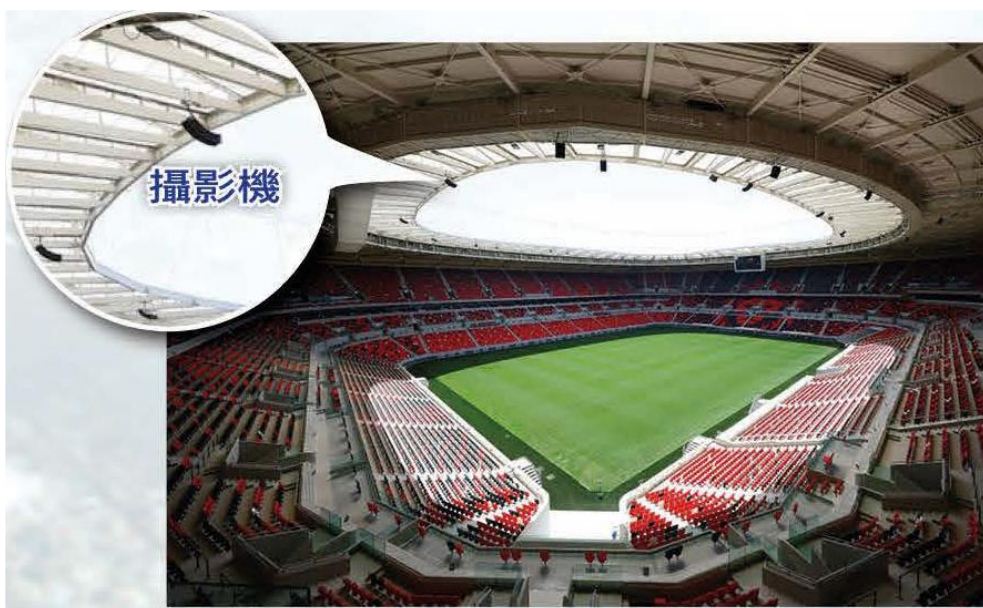
要讓無人機完美飛行，慣性測量單元 IMU 穩定飛行控制器技術至為重要，如圖 2.1.1 所示。如今無人機使用六軸 IMU，當中整合三軸加速度計與三軸陀螺儀，進行飛行穩定之控制，讓今日之無人機操作與飛行更容易與安全。六軸 IMU 不只讓無人機飛行姿態能容易抵抗外界干擾，如，強陣風，進而平穩飛行，而這種平穩的飛行能力，則可幫助使用者拍攝更清晰美麗的空拍畫面。因此，IMU 為無人機飛行控制提供了必要的姿態控制參考信息。

無人機透過慣性測量單元 IMU 的加速度計偵測目前飛行的加速度，而陀螺儀則是偵測無人機俯仰、翻滾和偏轉等旋轉屬性的變化，並藉由處理器不斷計算無人機的當前位置與姿態，防止機器姿態方向漂移。在實際運行方面，處理器能結合加速度與重力等感應估計值，計算當前速度，然後對速度進行積分，計算當前位置。無人機向任何方向飛行時，飛行控制器收集當前定位的 IMU 數據，然後將新數據發送到電子速度控制器

(ESC, Electronic Speed Controller)。這些電子速度控制器向電機系統發出信號，告知飛行器飛行或懸停所需的推力和速度水平。飛行控制器由許多組件組成，它是無人機的中央大腦，而 IMU 是無人機飛行控制系統的重要組成，提供運動感知功能，透過高精度、高可靠的 IMU 可以極大提升無人機的飛行能力，結合系統硬體、軟體和演算法的協同工作，除了可實現如懸停或急轉彎等複雜操作外，還可以結合衛星定位技術，打造高精度導航的能力。

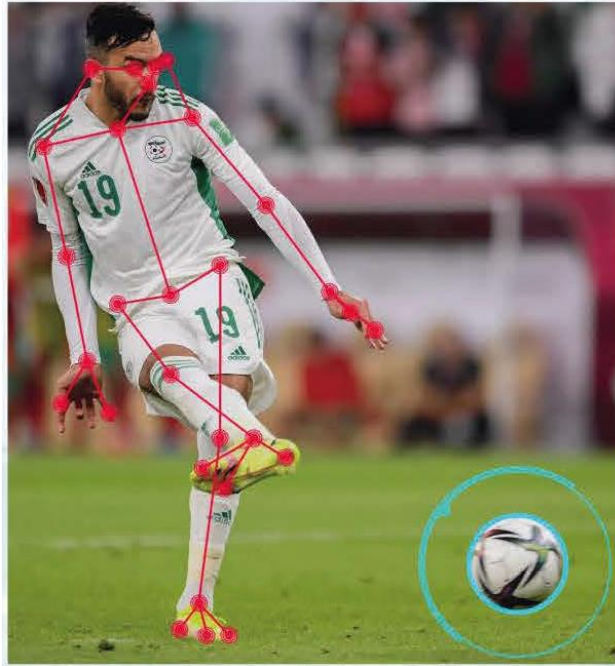
(2) IMU 於運動比賽-足球賽之越位判定的應用

由於越位進球不予計分，所以越位判定對足球賽局的公平性至關重要。然而，球場上球員運動變化神速，越位的呈現千變萬化，加上有時裁判所在位置無法全觀越位的發生，造成誤判，確實影響球賽公平性。為求越位判定的公平客觀，FIFA 在 2018 俄羅斯世界盃足球賽(FIFA World Cup™ in Russia)啟用了影像輔助裁判(VAR, Video Assistant Referee) 技術，如圖 2.1.2 所示，以配置在球場上的多部攝影機捕捉球員運動影像數據的方式，如圖 2.1.3 所示，來協助球場上的裁判判定越位，更在 2022 卡達世界盃足球賽(FIFA World Cup 2022™ in Qatar), 啟動了自 VAR 改良而來的半自動越位判定技術(Semi-automated offside technology)暨系統，此系統除了藉由多部攝影機即時追蹤球員在球場中的位置，球員肢體動作及足球的運動影像數據之外，更在比賽用的足球中配置有慣性測量單元(IMU) ，如圖 2.1.4 所示，來偵測球員踢球的時間點及腳碰觸足球的位置與足球受力等數據，藉之更有效且更明確地判定球賽中發生的越位事件。



資料來源：<https://www.reuters.com/> (2022)

圖 2.1.2 足球賽場屋頂處配置 12 支攝影機



資料來源：<https://www.fifa.com/> (2022)

圖 2.1.3 球員身上及手腳肢體上配置有 29 個反光點

半自動越位判定技術之架構及功能：

- ◆ 足球賽場屋頂處安裝 12 支追蹤攝影機，如圖 2.1.2 所示，追蹤球員及足球運動，且此攝影機每秒傳輸 50 筆影像資料給裁判中心；
- ◆ 球員身上及手腳肢體上共配置了 29 個反光點，如圖 2.1.3 所示，供攝影機追蹤球員的身體及肢體的運動及動作；
- ◆ 足球，球心配置了包含有微機電加速度計及微機電陀螺儀的一慣性測量單元(IMU)，如圖 2.1.4 所示，用來感測足球員踢球時，球受到球員的踢碰時間、位置及受力的大小及方向，且此 IMU 每秒傳輸 500 筆運動感測資料給裁判中心；



資料來源：<https://www.soccerbible.com/> (2022)

圖 2.1.4 足球球心配置有一慣性測量單元(IMU)

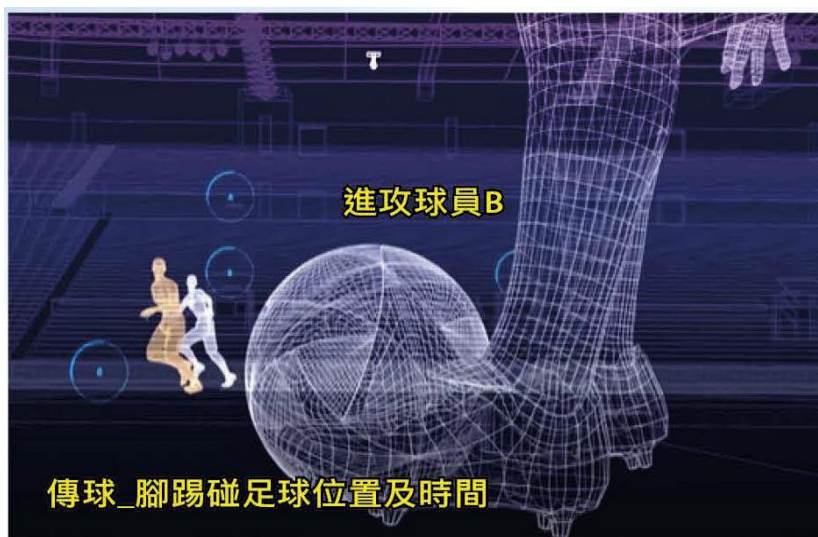
A. 關於越位

當足球在防守球隊球門的半場時，防守球隊於距離球門的倒數第二位防守球員 2 所在位置，(倒數第一位守方防守球員 1，一般是守門員，倒數第二位防守球員 2，一般是後衛)，與球門底線之間的區域便是越位區，如圖 2.1.5 所示，此時進攻球隊之進攻球員 B 不論是否位在越位區內，若球員 B 朝防守球隊球門的方向，向前傳球給位在此越位區內的進攻球員 A，如圖 2.1.6 所示，球員 A 不管是直接接球，或是足球碰觸地面或球門後的反彈接球，球員 A 都是越位。



資料來源：<https://www.sportsvideo.org/> (2022)

圖 2.1.5 進攻球員 A，手腳進入越位區



資料來源：marcaenzona.com/ (2022)

圖 2.1.6 進攻球員踢球位置及傳球時間

B. 越位事件的判定操作

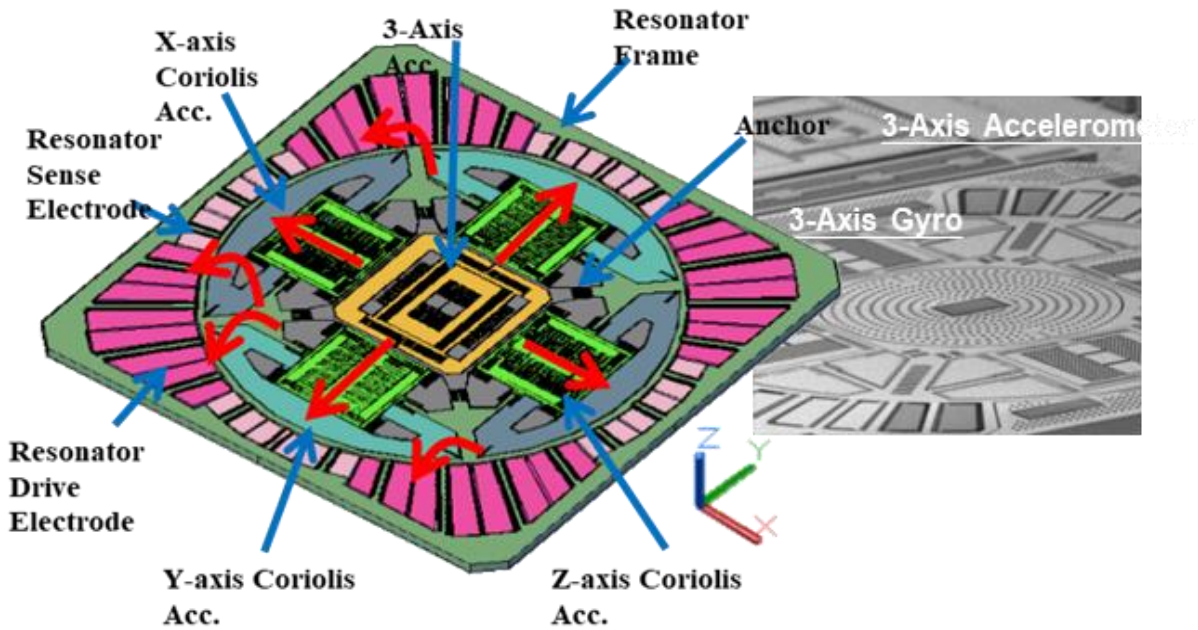
此半自動越位判定系統操作上，配置在足球場屋頂上的 12 支攝影機會追蹤攝影所有球員及足球於任何時間在球場上的位置，而附著在球員的身體、肢體、頭部、手部、足部的 29 個反光點位置及其等彼此間相對的方向、距離也為攝影機即時捕捉。此等影像數據，經此越位判定系統處理後，會產生虛擬越位線、越位面，或越位區域，用來比對進攻球員 A 所在的位置或是他的身體或其他肢體，如手部或足部，相對於防守球員 2 是否已超越越位線進入越位區域，如圖 2.1.5 所示。同時，如圖 2.1.6 所示，裝置在足球中心之慣性測量單元(IMU)中的加速度計則會藉由感測足球加速度的變化來偵測足球是否被球員所踢碰，並記錄此一足球被踢碰以致加速度變化的時間，另外，此慣性測量單元中的陀螺儀，則會感測足球隨時間變化的滾動或運動方向及速度。此等運動感測數據，可以用來判定進攻球員 B 揮腳踢球，碰觸足球的時間，以及足球的運動或滾動方向。

藉 AI (Artificial Intelligence)運算分析此等攝影機所捕捉之無從預期的影像數據，及 IMU 所感測的足球運動之瞬息萬變的加速度變化及滾動等運動數據，若對應出，進攻球員 A 的身體或肢體相對於防守球員 2，超過了越位線（面），進入越位區，且在此時間當下，進攻球員 B 踢球，且足球運動或滾動的方向是朝向進攻球員 A，即進攻球員 B 傳球給進攻球員 A，如此，越位事實於焉發生。經 AI 運算後判斷，符合越位的表現，則警示在裁判中心內執勤的影像裁判有越位事件發生，影像裁判再與場上裁判共同判定越位成立。

2. 微機電運動感測器結構及操作

(1) 關於慣性測量單元 (IMU)

慣性測量單元(簡稱 IMU)是測量物體三軸姿態角(或角速率)以及加速度的裝置。一個 IMU 構造主要是由三軸的陀螺儀和三個方向的加速度計組成，用來測量物體在三維空間中的角速度和加速度，並以此計算出物體的姿態。IMU 大多用在需要進行運動控制的設備，如汽車和機器人等，同時，也被用在需要用姿態進行精密位移推算的載具上，如無人機的慣性導航設備等。



資料來源：工研院 (2023)

圖 2.1.7 工研院首創 IMU 共構(3A3G)創新設計

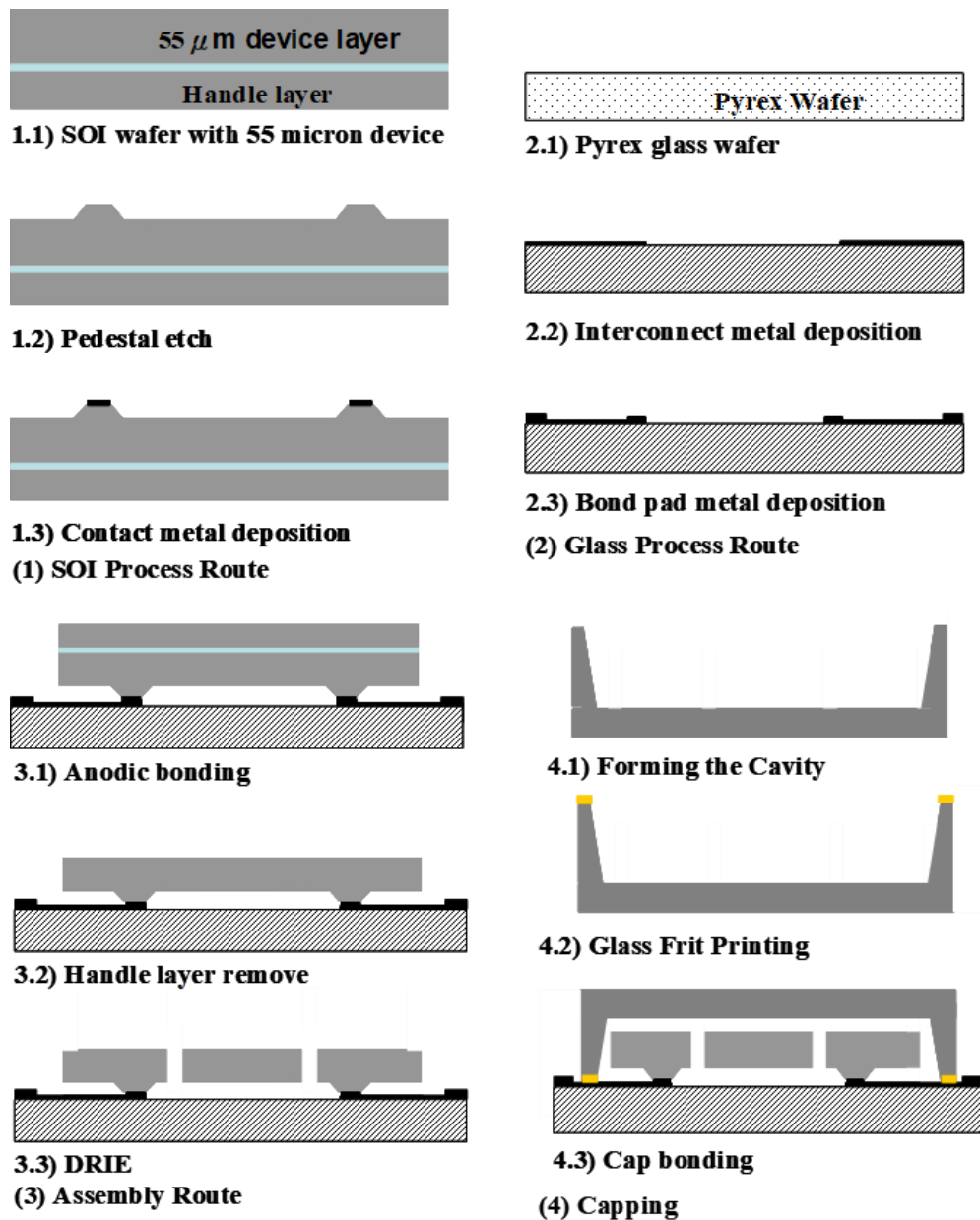
工研院提出創新之 IMU 共構(3A3G)設計，結構主要包含了三軸加速度計以及三軸陀螺儀，如圖 2.1.7 所示。三軸加速度計採三軸一體共構設計且設計於整個 6-DOF(Degree of Freedom, 自由度)感測元件的正中央。至於三軸陀螺儀，其結構則主要由四大部分，即振盪質量塊組(Seismic Proof Mass Set)，撓性彈簧組(Flexure Spring Set)，驅動感測電極組(Drive & Sense Electrode Set)以及調整電極組(Tuning Electrode Set)所組成。振盪質量塊組則包含了四組質量塊，第一組質量塊稱為振盪器(Resonator)，第二組與第三組質量塊則分別為 X 軸與 Y 軸柯氏加速度計(X-axis and Y-axis Coriolis Accelerometers)，第四組質量塊則為 Z 軸柯氏加速度計(Z-axis Coriolis Accelerometer)。此外，振盪器與柯氏加速度計皆藉由撓性彈簧組與固定導塊(Anchor)連接而懸浮於基材上，使振盪器與柯氏加速度計可以在基材上方運動。在驅動模態下(Drive Mode)，振盪器受到驅動電極(Resonator Drive Electrodes)作用，使振盪器繞著 Z 軸方向往復轉動，並在此運動狀態下達到共振態。由於彈簧的連接設計，所有柯氏加速度計亦同時被振盪器帶動於繞著 Z 軸向產生振動，亦即柯氏加速度計與振盪器在驅動模態下可視為一剛體皆沿著 Z 軸同步振動。而振盪器之運動狀態則藉由振盪器感測電極(Resonator Sense A and Resonator Sense B)量測。當外界角速度沿著 Z 軸輸入三軸角速度感測結構時將激發 Z 軸感測模態之運動。此時 Z 軸柯氏加速度計會受到柯氏效應(Coriolis Effect)之作用使 Z 軸質量塊沿著徑向產生往復振動，振幅大小正比於柯氏加速度。Z 軸柯氏加速度之運動則藉由其感

測模態之感測電極量測。當外界角速度沿著 X 軸向輸入陀螺儀時，X 軸柯氏加速度計則會因為柯氏加速度之作用使 X 軸感測質量塊繞著其支撐彈簧(沿著 Y 軸方向)產生出平面的往復轉動，此運動則藉由振盪器之運動構件下，基材上之感測電極所量測。相同地，當外界角速度沿著 Y 軸向輸入微陀螺儀時，Y 軸柯氏加速度計則會因為柯氏加速度之作用使 Y 軸感測質量塊繞著其支撐彈簧(沿著 X 軸方向)產生出平面往復轉動，此運動則藉由運動構件下方基材感測電極量測。

在元件的製作方面，以 SOI 製程、玻璃(Glass)製程、封蓋(Capping)製程以及組配(Assembly)製程等四個子製程，如圖 2.1.8 所示，製程說明如下：

以 2 微米寬- 40 微米深之高深寬比矽玻璃(silicon on glass)技術完成微型 IMU 製作。主要利用 SOG-體型微加工以及 DRIE 等兩種技術發展出一套簡單且可靠的製作流程。在 SOI 製程方面，我們使用 SOI 基板上層 45 微米厚矽材作為元件層。首先在元件層上蝕刻柱腳(Pedestal)，形成柱腳後，將複合金屬層沉積於柱腳上用以形成電性連接之接觸點。接著在柱腳之外的其他表面沉積鋁金屬層，做為 DRIE 時的導熱散熱層以避免微觀負載作用(Micro Loading Effect)的發生。在玻璃製程方面，以派熱克斯玻璃(Pyrex Glass)作為基板，並在此玻璃基板上沉積金屬連線與電容板之金屬層，之後再於金屬層上沉積作為接線點(Bond Pad)的金屬層。在本製程中，值得一提的是金屬連線與電容板之金屬層的厚度將影響後續陽極接合製程的品質，因此金屬層的厚度不宜太厚，使用約 800Å 的 Cr/Pt 複合金屬做為金屬連線。在 SOI 晶片以及玻璃晶片製程完成後，使用 SUSS SB6 在真空環境下以 400V 偏壓、420°C 進行陽極接合將兩晶片接合在一起。接著以 90°C 30% 的氫氧化鉀(KOH)溶液將 SOI 晶片的襯底(Handle Layer)去除，並使用氟化氫(HF)去除 SiO₂，再以 DRIE 成型結構厚度為 50μm、最小線寬/間隙為 3μm 的角速度計微結構後，移除做為散熱層的鋁金屬層。

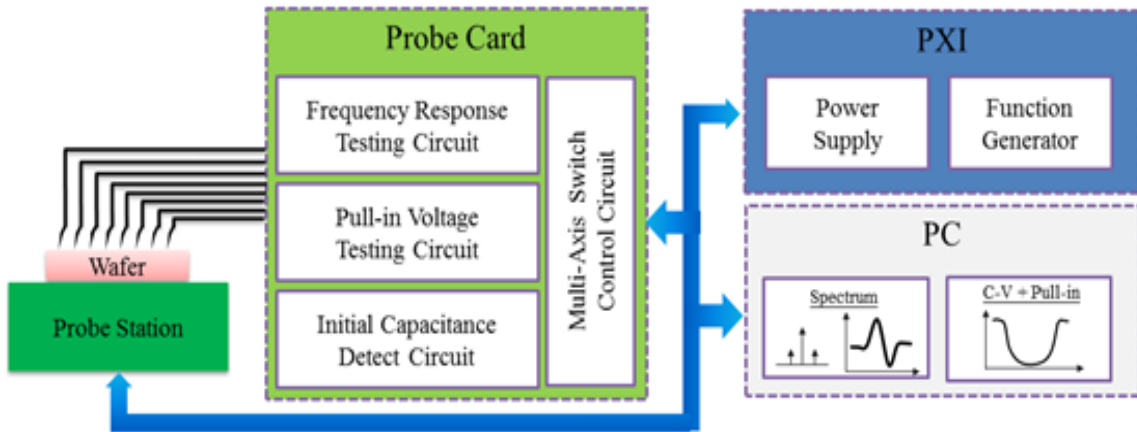
最後則是 Capping 製程的部分，在一矽晶圓上以 KOH 蝕刻深度為 80μm 的凹槽作為上蓋晶片，後以網印法將玻璃膏(Glass Frit)均勻塗佈於此上蓋晶片上，再以熱壓接合(Thermal Compressive Bonding)將角速度感測晶片與上蓋晶片在真空環境下接合，如此可確保三軸角速度計運作於真空環境下。



資料來源：工研院 (2023)

圖 2.1.8 慣性測量單元(IMU)之製作與組裝製程

在測試方面，藉一自動化與可程式化之晶圓級微感測器測試平台測試系統架構，如圖 2.1.9 所示，進行晶圓級微感測器於室溫下之初始電容、振盪頻率、吸附電壓(Pull-in Voltage)品質因子等性能之量測，透過上述量測，可初步判斷微感測器之振盪性能、共振頻率與頻差驗證。測試平台系統將包含探針台(Probe Station)之晶圓載具、探針卡(Prob Card)含數位串列分析儀(DSA, Digital Serial Analyzer)與資料擷取(DAQ, Data Acquisition)系統之儀器卡的儀表週邊組件互連標準擴展型(PXI, PCI eXtensions for Instrumentation)電腦。



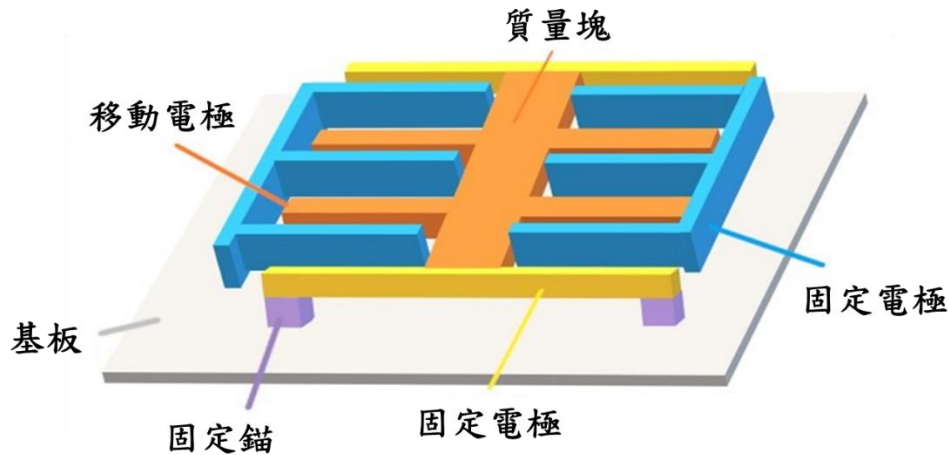
資料來源：工研院 (2023)

圖 2.1.9 晶圓級微感測器測試系統架構

(2) 關於加速度計

微機電系統-加速度計(Microelectromechanical Systems Accelerometer)是一種採用微機電系統(MEMS)技術所製造的慣性感測器或傳感器元件，依受壓形變產生電壓變化、電容變化及慣性熱場變化等設計原理衍生出壓電式、電容式及熱感式三種微機電加速度計。其中特性優異的電容式微機電加速度計(Capacitive Microelectromechanical Systems Accelerometer)，利用 MEMS 技術將微小的機械結構和可變電容整合在一個晶片上，工作原理包含：(1)電容變化和牛頓第二運動定律。當兩個電極之間的電容器的間隙改變時，其電容值也會相應改變；當間隙變窄時，電容值增加；當間隙變寬時，電容值減小。藉測量電容值變化，可推斷加速度的大小。(2)根據牛頓第二運動定律，當物體受到加速度作用時，質量結構會產生相應的變形或移動，導致電擊間之間隙改變，進而影響電容值。同樣地，藉測量電容值的變化，可反推物體所受的加速度。

電容式微機電加速度計之設計，包含兩個主要組件：移動結構和固定結構。移動結構是電容式加速度計的核心部分，主要由質量塊和移動電極與支撐彈簧組成，質量塊可以是彈簧懸掛的質點或彈性樑結構，而移動電極則位於質量塊上。當物體受到加速度作用時，質量塊會產生相對應的移動，進而改變移動電極的位置。其次，固定結構是固定在基板上的靜態電極，它與移動電極之間形成一個可變電容間隙。當移動結構發生變形或移動時，間隙的大小也會相應改變，進而改變電容值。微機電加速度計的結構示意圖，如圖 2.1.10 所示。



資料來源：工研院 (2023)

圖 2.1.10 微機電加速度計結構示意圖

為測量電容值的變化，需要特用讀取電路，電路中包括類比前端電路、類比數位轉換電路與數位控制電路。透過特用讀取電路，可將感測晶片因加速度產生的電容變化轉換成數位訊號，以便與手機、相機、與平板等電子產品進行整合應用。

製作上，以 SOI 製程、玻璃(Glass)製程、Capping 製程以及 Assembly 製程等四個子製程，如圖 2.1.11 所示，製程說明如下：

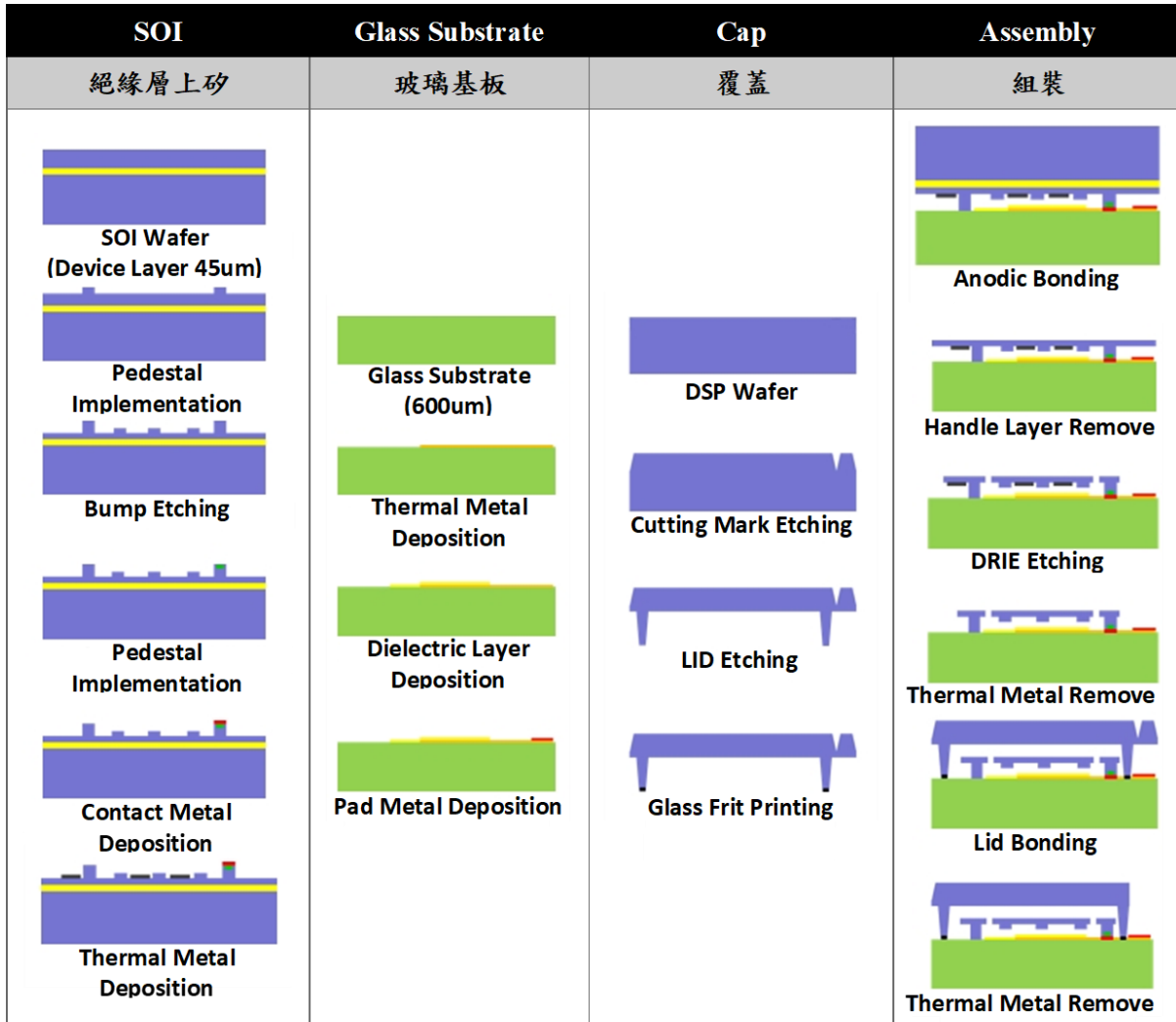
SOI 製程：以 SOI 晶圓元件層作感測結構。首先在元件層上蝕刻出柱腳 (Pedestal)做為感測結構體之支柱，和玻璃基座(Substrate)相連。形成柱腳後，再向下蝕刻出小凸塊(Bump)預防結構層與基座接面的附著(Stiction)。接著再將複合金屬層沉積於柱腳上，用以形成電性連接之接觸點，藉此將電訊號與玻璃上之導線連接。

玻璃(Glass)製程：在此製程中，須注意是金屬薄膜形成圖樣(Pattern)後需平整，且晶片表面要保持潔淨，以確保金屬薄膜與晶片黏附良好。

在上蓋(Lid)製程的部分，在一矽晶圓上以 KOH 蝕刻出凹槽作為上蓋晶片。

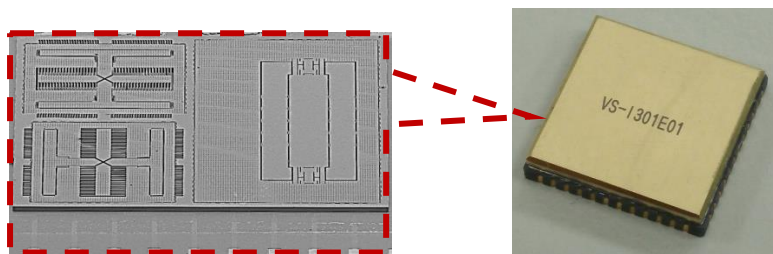
在 SOI 晶片以及玻璃晶片製程完成後，使用 SUSS SB6 晶圓結合機在真空環境下以 400V 偏壓、420°C 進行陽極接合將兩晶片接合在一起。接著以 KOH 溶液將 SOI 晶片的 Handle Layer 蝕刻去除。再使用 HF 去除 Device Layer 上方之 SiO₂，再以 DRIE 成型最小線寬/間隙為 2 微米的感測結構。最後則是以網印法，將 Glass Frit 均勻塗佈於上蓋晶片上，再以熱壓接合

(Thermal Compressive Bonding)將感測結構晶片與上蓋晶片在特定壓力環境下接合。完成接合製程後的加速度計外觀，請參看圖 2.1.12。



資料來源：工研院 (2023)

圖 2.1.11 MEMS 加速度計的製程



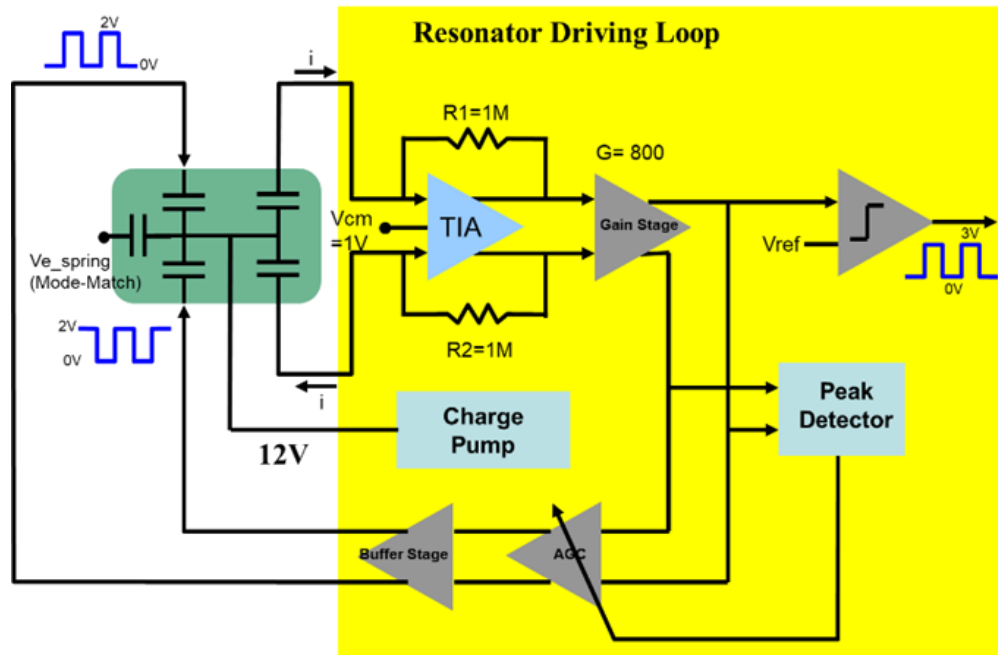
資料來源：工研院 (2023)

圖 2.1.12 工研院開發之加速度計

(3) 關於陀螺儀 (Gyroscopes)

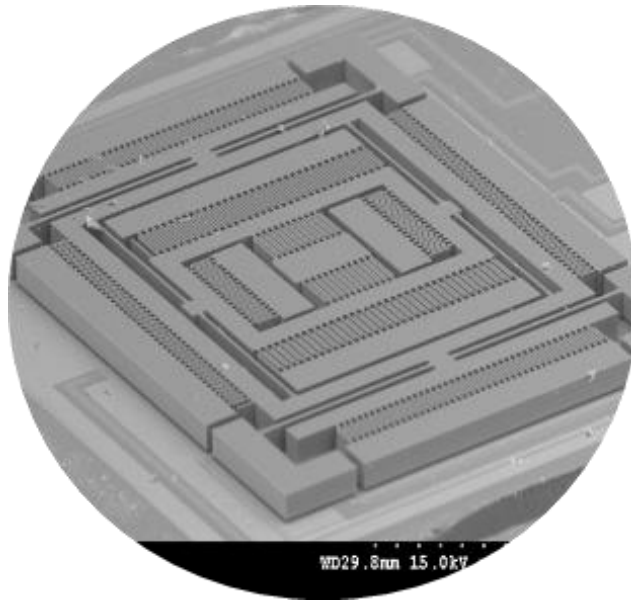
MEMS 陀螺儀是另一種重要的運動感測器，它們被大量應用於汽車領域，例如車輛穩定性控制、負載均衡和側翻檢測。汽車需要 MEMS 陀螺儀以實現高效的制動和懸吊系統。

MEMS 陀螺儀的基本工作原理是有一個振盪組件，當振動組件沿著垂直於振動方向的軸進行旋轉時，振動組件將受到柯氏力(Coriolis Force)作用，此時振盪組件上的柯氏加速度計會產生一與柯氏力成正比的信號輸出，用以判斷角速度，而處理此等運動感測及柯氏力訊號之產生與對應之旋轉感測訊號之輸出的相關電路概念則如圖 2.1.13 所示。MEMS 陀螺儀必須具有很強的抗振動和衝擊能力。用於高級駕駛輔助、側翻檢測及其預防、安全和安保、車載導航和光學防手振(OIS, Optical Image Stabilization)攝影鏡頭等應用。另外，陀螺儀還被大量用於包括相機穩定、天線穩定、慣性導航系統、遙控車輛、電子、工業和醫療保健。



資料來源：工研院 (2023)

圖 2.1.13 工研院開發之陀螺儀元件電路設計方塊圖



資料來源：工研院 (2023)

圖 2.1.14 工研院開發之單軸陀螺儀結構圖

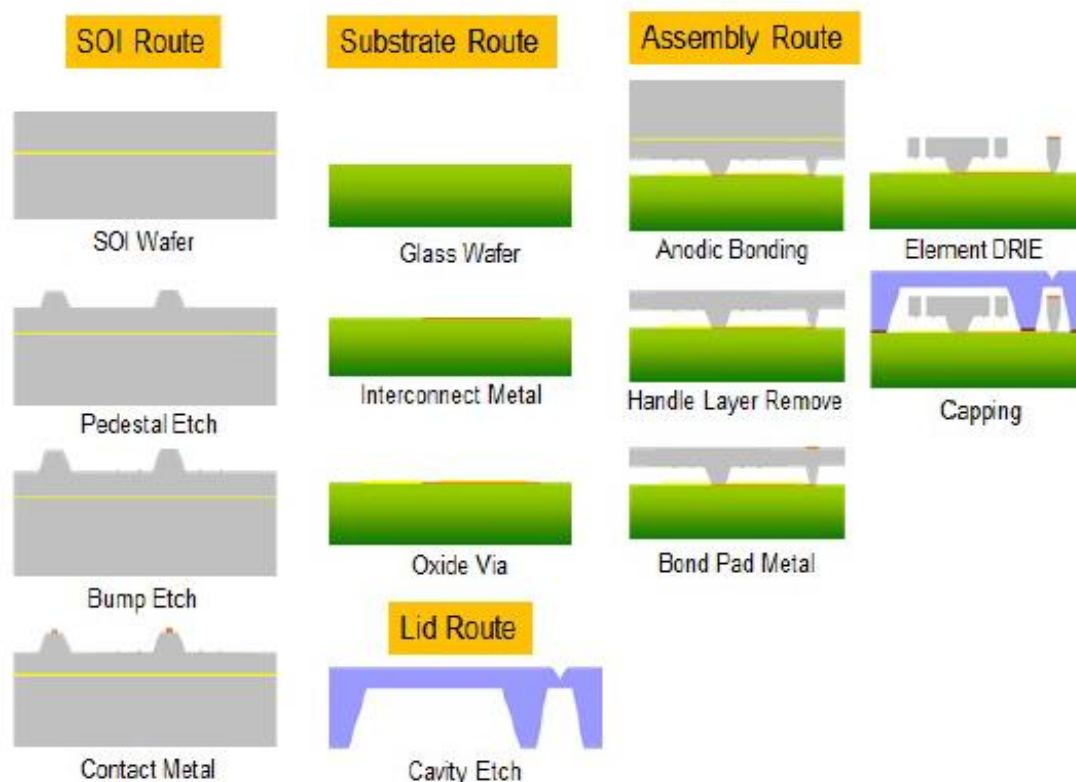
以工研院開發之 Z 軸微型陀螺儀為例，如圖 2.1.14 所示，這是利用 2.5 微米寬- 40 微米深之高深寬比 Silicon On Glass (SOG) 技術完成微型陀螺儀製作。主要利用 SOG 體型微加工以及 DRIE 等兩種技術發展出一套簡單且可靠的製作流程。圖 2.1.15 為 Z 軸角速度計的製作與封裝流程，主要包含了 SOI 製程、Glass 製程、Assembly 製程以及 Capping 製程等四個子製程。

在 SOI 製程方面，使用 SOI 基板上端矽層作為元件層。首先在元件層上蝕刻柱腳(Pedestal)，形成柱腳後，將複合金屬層沉積於柱腳上用以形成電性連接之接觸點。接著在柱腳之外的其他表面沉積鋁金屬層，做為 DRIE 時的導熱散熱層以避免 Micro Loading Effect 的發生。

在玻璃製程方面，以派熱克斯玻璃(Pyrex Glass)作為基板，並在此玻璃基板上沉積金屬連線與電容板之金屬層，之後再於金屬層上沉積氧化層作為電性隔離。在本製程中，值得一提的是金屬連線與電容板之金屬層的厚度將影響後續陽極接合製程的品質，因此金屬層的厚度不宜太厚。

在 SOI 晶片以及玻璃晶片製程完成後，使用陽極接合機台(Anodic Bonding)在真空環境下以高電壓高溫方式進行陽極接合將兩晶片接合在一起。

接著以 KOH 溶液將 SOI 晶片的 Handle Layer 的矽去除，並去除 SiO₂。之後在元件層背面定義並沉積金屬做為訊號輸出接點，再以 DRIE 成型角速度計微結構並移除做為散熱層的鋁金屬層。最後則是 Capping 製程的部分，在一矽晶圓上以 KOH 蝕刻凹槽作為上蓋晶片，後以網印法將 Glass Frit 均勻塗佈於此上蓋晶片上，再以熱壓接合(Thermal Compressive Bonding)將角速度感測晶片與上蓋晶片在真空環境下接合，如此可確保角速度計運作於真空環境下。

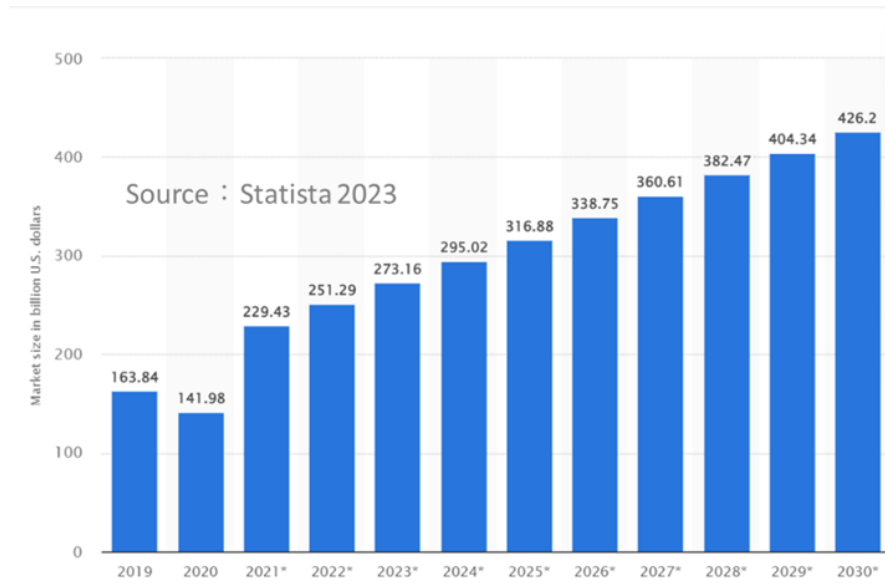


資料來源：工研院 (2023)

圖 2.1.15 Z-軸微陀螺儀製作流程

3. 微機電運動感測器之市場狀況

隨著各類智慧型手持裝置、物聯網(IoT)應用以及各種自主移動載具(無人機、AMR: Autonomous Mobile Robot)的蓬勃發展，帶動全球感測器產業迅速發展，其在各領域的使用需求隨著應用擴展與延伸已變得愈加廣泛。請參閱圖 2.1.16，感測器市場規模預計將從 2023 年的 2512.9 億美元以複合年增長率 8.29%增長到 2030 年的 4,262 億美元。

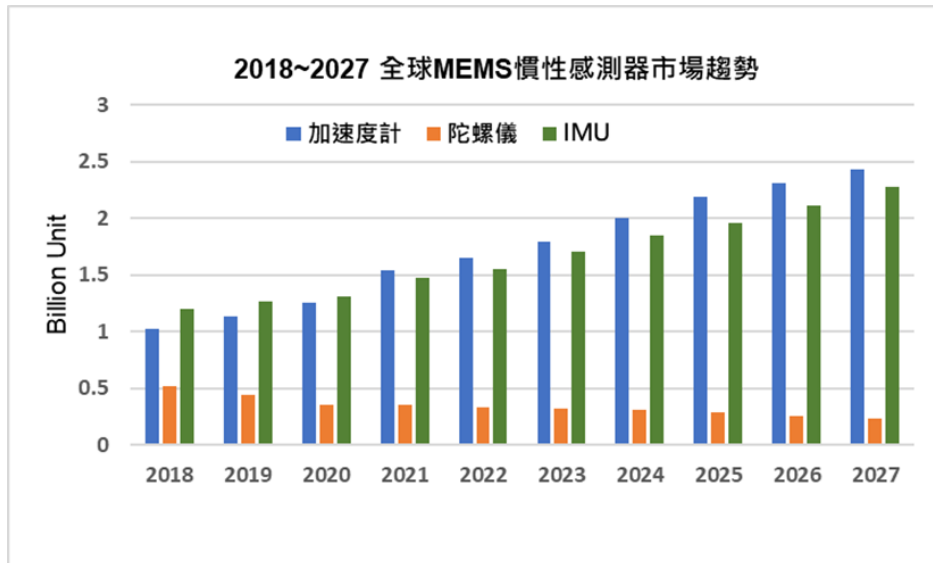


資料來源：Statista (2023)

圖 2.1.16 2021 年至 2030 年全球感測器市場預測

在感測器應用分類上可分為商業用、工業用與軍事用途。根據銷售量來看，商業應用的消費電子佔感測器應用領域的絕大部分，主要應用在手機、平板與穿戴式電子裝置等，這也是目前各國際大廠產品應用的目標市場。隨著工業市場與 5G 物聯網(IOT)的興起以及無人機、自駕車、AMR 等相關應用的蓬勃發展，將進一步推升感測器的應用需求，特別是運動、位置感測的慣性測量單元 IMU。其中，對高功能慣性測量單元的需求，例如自駕車、機器人、無人機等，對自主航控的需求，尤其對精度與安全性的敏感性需求，將替高階 IMU 帶來龐大商機。

全球微機電運動感測器產業分布中，主要為美國及歐洲，產值佔全球 80%以上，主要供應商有 STMicroelectronics、ADI、Bosch Sensortec、TDK、Kionix 等。請參閱圖 2.1.17，從市場產品結構來看，MEMS 加速度計、IMU 市場持續增長，MEMS 陀螺儀的市場呈現逐年萎縮態勢，主要原因係獨立的 MEMS 陀螺儀在高端消費電子和汽車電子市場中已逐漸被 IMU 所替代。其中，全球 MEMS 加速度計市場規模 12.19 億美元、15.37 億顆，預計 2027 年將增長至 16.41 億美元、24.28 億顆，2018-2027 年銷售額及銷售量的複合增長率分別為 6.72%和 10.08%。



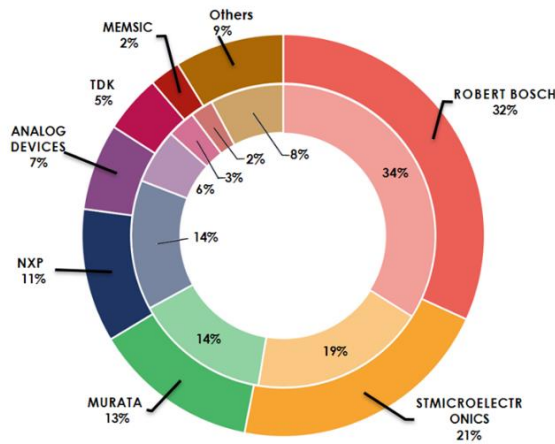
資料來源：工研院 (2023)

圖 2.1.17 全球慣性感測器產品市場趨勢

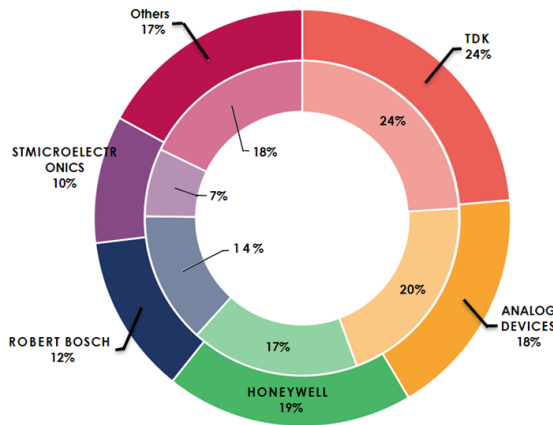
分析全球主要慣性感測元件廠商的市佔率，請參閱圖 2.1.18，在加速度計方面，Bosch 和 STM 仍是 MEMS 加速度計的領導者。雖然在汽車 MEMS 領域的廠商(Bosch、Murata、NXP、Analog Devices)在 2020 年因汽車銷量和產量下降而遭受損失，但在 2021 年，由於電動汽車安全功能，如安全氣囊加速計、胎壓偵測系統(TPMS, Tire-pressure Monitoring System)等的性能提升以及汽車零部件(ASP, Automotive Spare Parts)的提高，逐步恢復成長。另外，消費類應用的廠商在消費類電子產品，譬如筆記型電腦、平板電腦、智能手機、可穿戴設備等，有了顯著的業績成長，例如 STM，市占率從 2020 的 17% 增至 2021 年的 21%。隨著汽車安全和 TPMS 市場恢復增長，NXP 和 Murata 的收入亦有所增長。Analog Device 則正逐漸專注於更多高值應用市場，例如工業市場，在這些市場上提供更多感測器；在陀螺儀市場方面，五家廠商佔據了 80% 以上的市場份額，其中 TDK、Honeywell、Analog Devices 等活躍於工業市場的廠商處於領先地位。TDK 的大部分收入來自用於智能手機、數位相機和遊戲的光學和電子影像穩定(OIS, Optical Image Stabilization/ EIS, Electric Image Stabilization) 的陀螺儀，Honeywell 的收入來自工業、國防和航空工業，而 Analog Devices 的市場主要在汽車和工業應用。隨著 IMU 應用的增加，相關廠商發布的新產品有越來越多的趨勢。在 IMU 市場方面，Bosch、TDK、STM 繼續引領 IMU 市場，超過 75% 的市占率，其中 Bosch 來自智能手機和可穿戴設備，特別是耳戴式設備等消費設備的應用擴大，以及汽車應用中從陀螺儀到 IMU 的轉變促使 IMU 收入成長。TDK 由於客戶群和應用的擴大，特別是消費市場，使得 TDK 的慣性 MEMS 收入也大幅增長。STM 則受益於 IMU 應用，如導航，和消費電子產品，如智能手機、可穿戴設備等業務的不斷擴大。

其他廠商主要應用在工業、國防和航空航天領域，例如 Analog Devices 和 Honeywell，這些公司在小批量中使用更昂貴的 IMU。

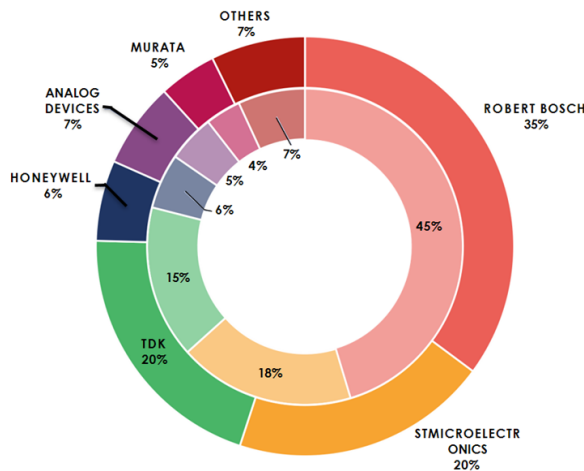
MEMS accelerometer market shares



MEMS gyroscope market shares



MEMS IMU/combo market shares



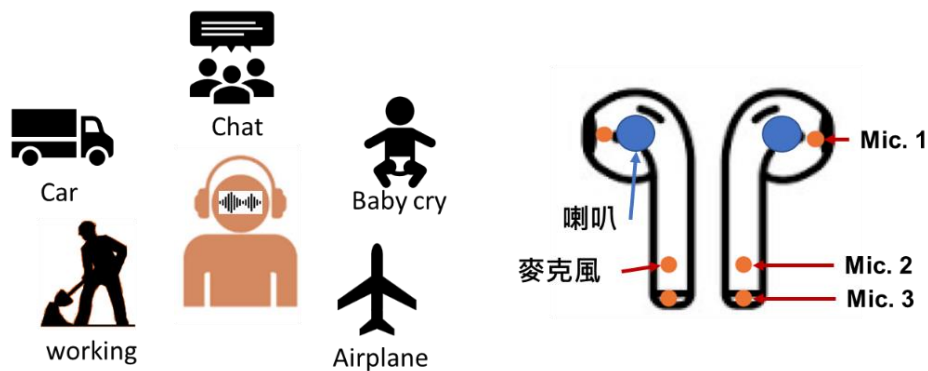
資料來源：Yole (2022)

圖 2.1.18 全球慣性感測器產品廠商市占率

(二) 麥克風

1. 微機電麥克風於耳機之主動降噪的應用

主動式降噪(ANC, Active Noise Cancellation)是一種藉由對抗環境中的噪音，使聆聽者能夠享受更清晰、更寧靜的聲音的技術，如圖 2.1.19 所示。這項技術被廣泛應用於耳機、車輛、飛機和其他需要降低噪音的產品中。主動式降噪的原理涉及聲學、信號處理和控制系統等多個領域，需要複雜的硬體和軟體設計來實現。



資料來源：工研院 (2023)

圖 2.1.19 (左)噪音來源示意圖 (右)耳機中麥克風與喇叭位置配置示意圖

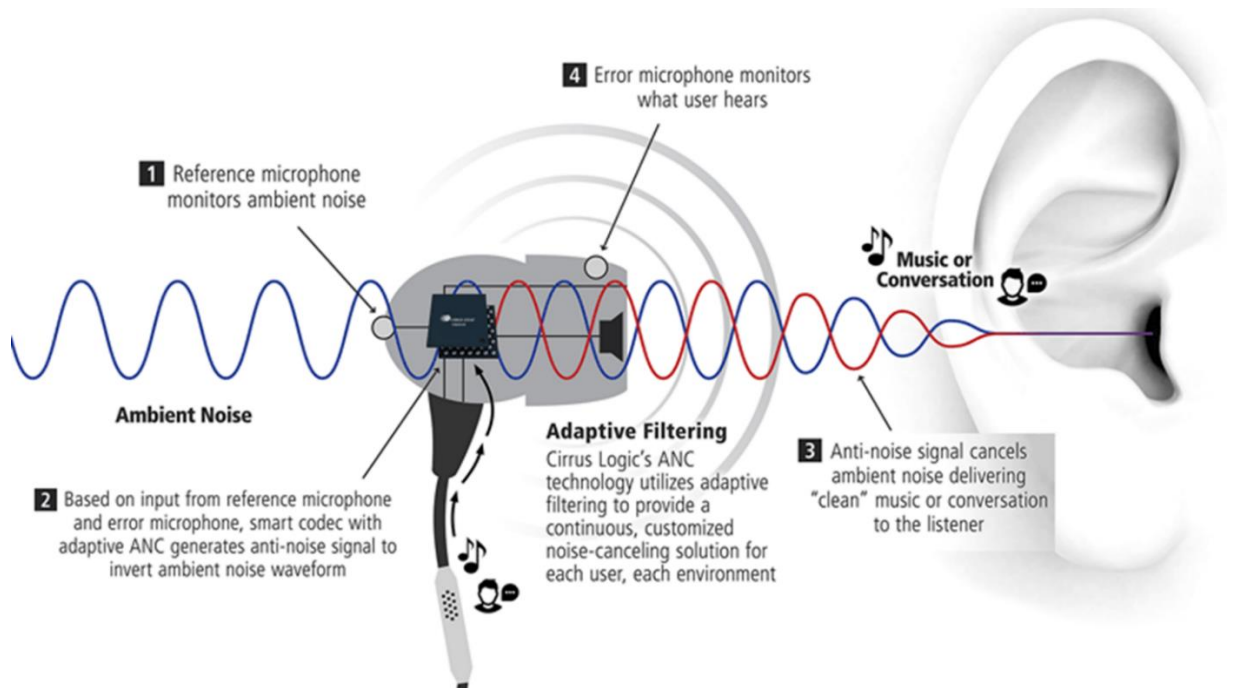
想像您在搭捷運時打電話給朋友。周遭的人都在講話、列車進站風切聲和離站的關門提醒聲、行李箱滑過瓷磚地板，此外可能還有嬰兒的哭泣聲。電話另一頭的朋友身處在工廠中，不時傳來金屬碰撞聲，馬達/風扇運轉的聲音，甚至是天空中突然經過的飛機產生的噪音。但是對話的兩端卻不是嘈雜混亂的聲音，而是平靜且清晰的交談。一切都要歸功在目前的音訊產品中，如手機或是耳機等，已經十分普及的雜訊抑制與主動降噪。

在前饋式主動降噪中，麥克風安裝在耳機的外部 (如圖 2.1.19(右)圖，麥克風 Mic. 2)，以接收外部噪音訊號，將其反相後，然後透過喇叭添加到音頻中以消除噪音。此外，還必須考慮噪音的傳播路徑，並在正確的噪音從麥克風傳到耳膜之前產生抗噪訊號。因此，如果將麥克風放在離耳朵較遠的地方將不僅會延遲更多的時間，而且麥克風收集的噪音可能會與實際到達耳朵的噪音有所不同，如此不但無法消噪反而產生更多噪音。

在反饋式主動降噪中，麥克風位於耳機的內部(如(右)圖麥克風 Mic. 1)，可以擷取到使用者耳朵內部的聲音。然後將耳朵中的聲音與音頻源進行比

較，透過反饋算法識別出噪音並產生抗噪音以將其消除。但此方法很難設計出一種適用於多種耳朵和噪音中的濾波器，使其能有效的運作。

因此，混合式主動降噪透過結合前饋和反饋降噪的優點，具有前饋系統的外部麥克風以接收環境噪音，也有內部麥克風以擷取用戶在音樂播放之外聽到的聲音。使用正確的演算法和過濾，這種組合將非常有效。因此，現有的高階降噪耳機中，在一個耳機裡就會配有一個喇叭和三個微機電麥克風，如圖 2.1.20 所示，一個主要用於通話時的收音，另外兩個主要用於降噪功能。

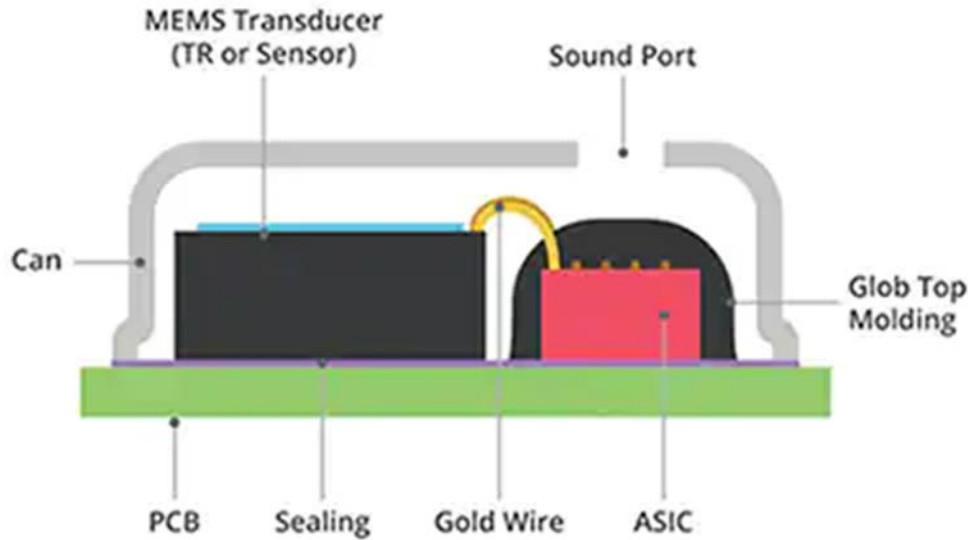


資料來源：Cirrus Logic (2023)

圖 2.1.20 混合式主動降噪的架構示意

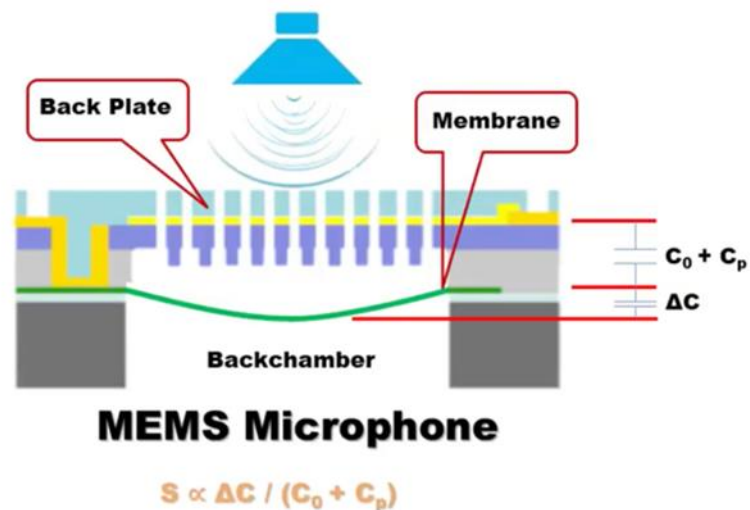
2. 關於麥克風裝置

透麥克風背板的聲學洩音孔至感測振膜上，讓感測振膜隨著環境聲壓變化產生形變，進而改變與背板之間的電容值，再經由音訊晶片解析輸出成類比或是數位訊號，如圖 2.1.22 所示。



資料來源：工研院 (2023)

圖 2.1.21 MEMS 麥克風模組



資料來源：工研院 (2023)

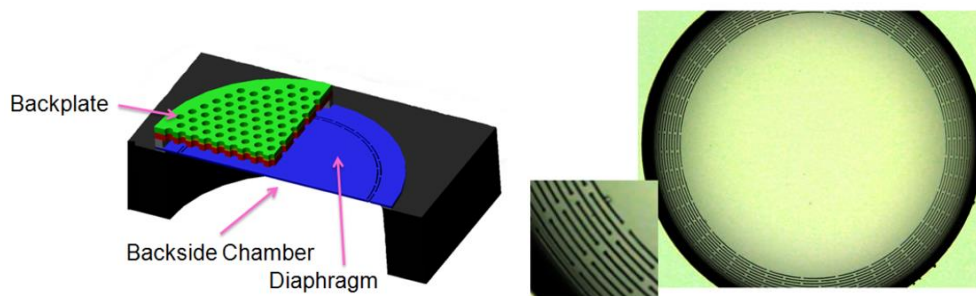
圖 2.1.22 電容式 MEMS 麥克風工作原理

電容式 MEMS 麥克風設計需注意的關鍵參數包括：

- 訊噪比(SNR, Signal-to-noise Ratio)：為參考訊號對麥克風輸出訊號雜訊的比值。
- 靈敏度：針對聲壓位準(SPL, Sound Pressure Level)回應的類比或數位輸出值。
- 靈敏度容差：嚴格的靈敏度容差，可在使用多個麥克風時確保一致性。

- 動態範圍：麥克風呈線性響應時，最大和最小 SPL 之間差異值的度量。
- 總諧波失真(THD, Total Harmonic Distortion)：指麥克風在訊號輸入並經過放大器處理之後，輸出訊號比原始輸入訊號多出的額外諧波及倍頻成分所佔之總比例。
- 聲學過載點(AOP, Acoustic Over Point)：此參數決定麥克風能夠偵測出的最高訊號位準，且不會音訊品質過於失真。
- 頻率響應：可運作的音頻範圍。
- 啟動時間：麥克風喚醒和輸出有效訊號以回應觸發事件的速度。

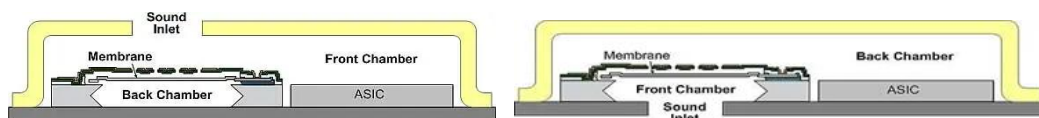
在上述設計參數中，以提高電容式 MEMS 麥克風的靈敏度、SNR、AOP 等參數為主要發展趨勢。要提升其靈敏度通常經由調整感測振膜的特性來達成，以 MEMS 麥克風為例，是在感測振膜上挖出孔槽，形成的交錯彈簧來釋放製程所產生的應力，如圖 2.1.23 所示。



資料來源：工研院 (2023)

圖 2.1.23 工研院的電容式 MEMS 麥克風結構

此外封裝與收音的形式，亦影響麥克風的靈敏度，請參閱圖 2.1.24。圖 2.1.24(左圖)所示是傳統 Top-port 封裝，易損感測器靈敏度，而導致 SNR 低，且損害高頻響應。(右圖)則是 Bottom-port 封裝，可提高靈敏度，並有更的 SNR，且同時改善低頻響應。



資料來源：<https://ppfocus.com/0/aucd6405e.html> (2023)

圖 2.1.24 常見的 MEMS 麥克風封裝形式

雜訊主要來自於 MEMS 麥克風、讀取電路，即音訊 ASIC 與封裝等三因素，故欲提升 MEMS 麥克風模組整體的 SNR，須從這三方面著手。電容式 MEMS 麥克風的雜訊，大部分是在運作時由背板與感測薄膜之窄小

間隙中的空氣受到擠壓產生的熱噪音(Thermal Noise)所造成。因此降低麥克風元件內的空氣阻尼(Air Damping)的影響，可提升麥克風模組的 SNR。

電容式 MEMS 麥克風的設計具高挑戰性，除了 MEMS 麥克風元件的結構設計，搭配的音訊 ASIC 及封裝也須做整體考量，以便在眾多相互衝突的關鍵設計參數中取得平衡，藉之符合高靈敏度、高 SNR、高 AOP、防止灰塵或水氣入侵，與更薄、更小的封裝尺寸的市場需求。

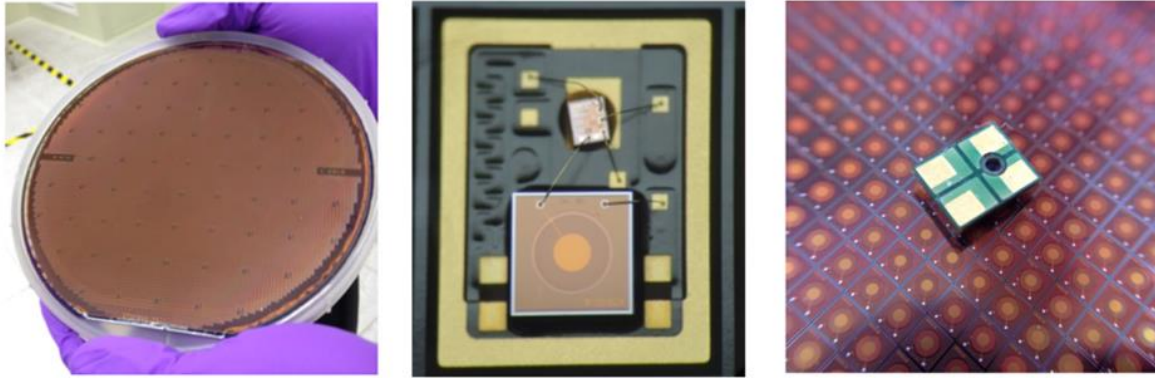
MEMS 麥克風的結構依據工作原理、各個廠商的設計理念及其所望達到的效能而有所不同，因此各家的 MEMS 麥克風製作流程也就有所差異。此處以工研院過去所發展的單背板(Single Backplate)電容式 MEMS 麥克風，如圖 2.1.25 所示為例，說明麥克風的製作流程如下：

先在矽晶圓上進行氧化矽層成長，當作絕緣層和作為進行晶背矽深蝕刻過程中的蝕刻終止層。接著在矽氧化層上沈積上一層薄的導電多晶矽，並進行黃光與蝕刻製程，將多晶矽感測振膜製作出來。沈積一層氧化矽作為犧牲層，接著使用黃光與蝕刻製程，在犧牲氧化矽層上進行部分蝕刻，以製作 Dimples(淺凹)結構，可避免結構發生靜電吸附(Pull-in)時，造成的背板與感測薄膜沾黏而導致其電容功能永久失效的狀況。

接著進行背板結構的製作，工研院開發的 MEMS 麥克風的背板是由氮化矽/鋁/氮化矽三層材料所組成的複合背板結構。

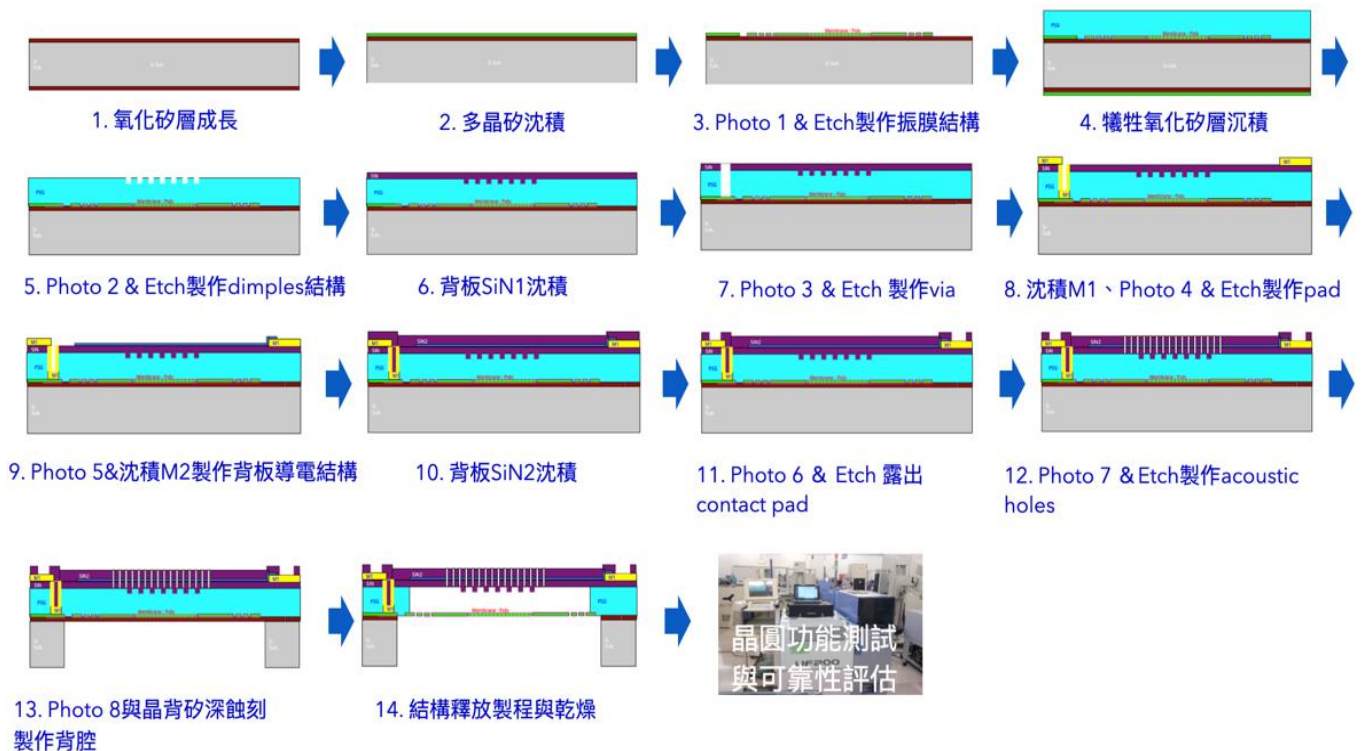
使用黃光與蝕刻製程將 Contact Pads(接觸鐳點)露出，接著重複使用黃光與蝕刻製程在複合背板上開出許多小洞，以作為聲學洩音孔。

在晶圓的晶背進行黃光製程，以定義出麥克風的背腔區域，並利用矽深蝕刻製程對背腔區域的矽基材進行蝕刻，至完全移除矽基材為止，此時，感測振膜會夾在氧化矽與犧牲氧化矽層之間，並與複合背板結構相連。最後利用氫氟酸溶液或是氟化氫氣體將感測振膜下方的氧化矽與上方的犧牲氧化矽層去除掉，如此就可以將感測振膜與複合背板分離，形成可活動的薄膜結構，再經過乾燥與抗沾黏處理後就完成麥克風元件的製程。圖 2.1.26 所示為工研院所開發的電容式 MEMS 麥克風製程。



資料來源：工研院 (2023)

圖 2.1.25 工研院所開發的電容式 MEMS 麥克風



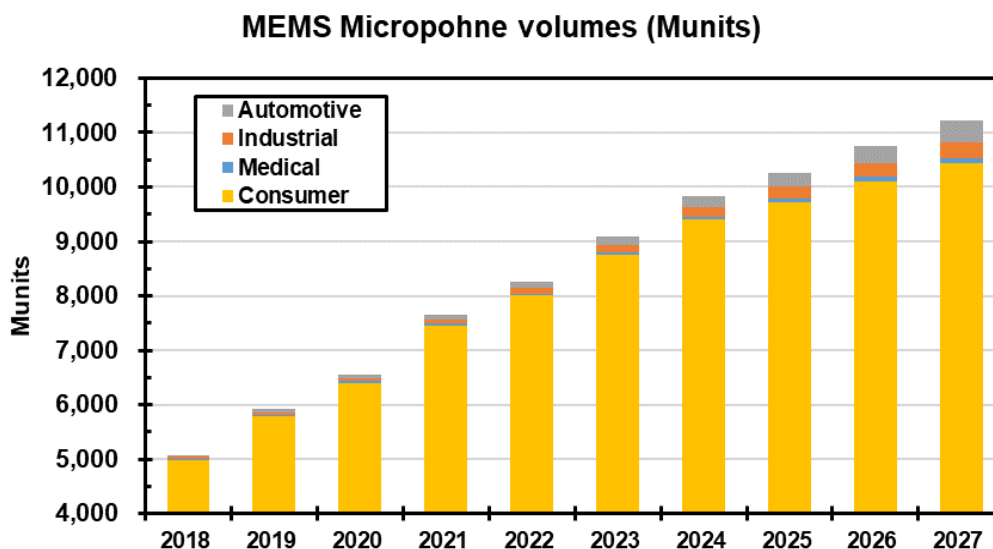
資料來源：工研院 (2023)

圖 2.1.26 工研院電容式 MEMS 麥克風的製程流

3. 麥克風之市場概況

微機電麥克風是一種利用微機電系統MEMS技術製造的微型麥克風，具有低功耗、高訊噪比、高性價比等優點，應用於工業、醫療、車用以及消費性電子產品。適用於各種3C智能設備，如手機、筆記型電腦、平板、耳機、智慧手錶、智能音箱/電視等。

根據 Yole 市場調查報告，2027 年全球微機電麥克風市場規模將達到約 23.3 億美元，在 2021-2027 年市場規模預計將以超過 9% 的年複合成長率(CAGR)增長。而麥克風主要的出貨量集中於消費性電子(佔比超過 98%)，如圖 2.1.27 所示。在消費性電子產品中，又以真無線藍牙耳機(TWS Headphones, True Wireless Stereo Headphones)為最重要的成長動能，在 2027 年耳機成長至約 5.7 億組，年複合成長約 10.7% (2021~2027 年)。因為要達到主動降噪的功能，單一個耳機上的麥克風的數量已經增加至三個麥克風。預計在 2027 年微機電麥克風約有 28.5 億顆的出貨量，佔據所有微機電感測器的 25%。



資料來源：Yole (2017)

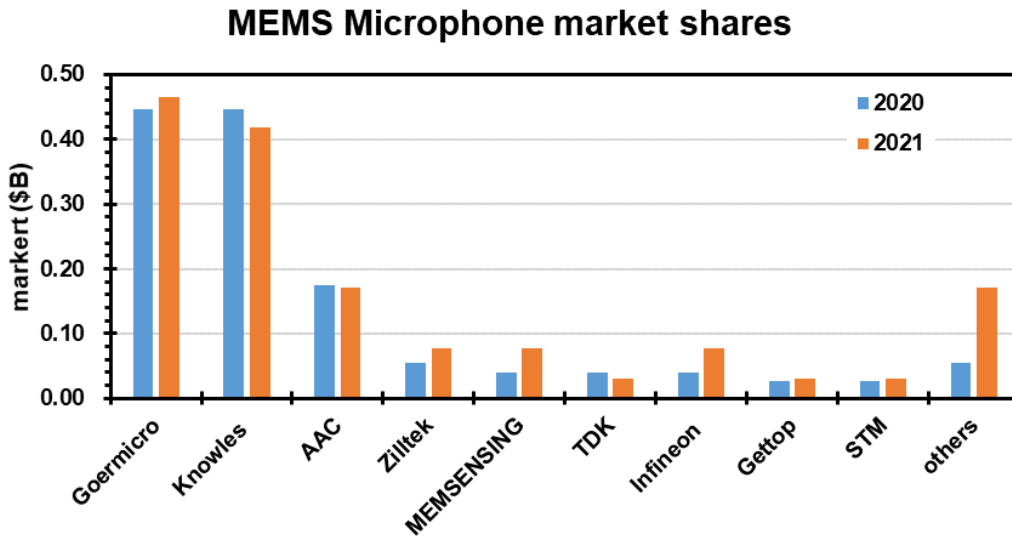
圖 2.1.27 微機電麥克風在不同應用的出貨量

全球微機電麥克風市場呈現出高度競爭和集中的特徵，在 2020 年主要由前三大公司壟斷近八成，分別是 Goermicro (中國) 佔 33%、Knowles (美國) 佔 33% 以及 AAC Technologies (中國) 佔 13%。然而，到了 2021 年，後進者開始試圖進入和挑戰麥克風市場，使得前三大廠商的市佔率降到 68%。

如 Vesper (美國)、TDK (日本)、Zilltek (台灣)、Fortemedia (台灣)、New Japan Radio (日本)、Gettop (中國)、MEMSENSING (中國) 等，如圖 2.1.28 所示。

其中，微機電麥克風元件主要是由 Infineon 和 Knowles，兩大廠商佔據超過 65%，出貨量約 43 億顆麥克風。尤其是 Apple 和 Samsung 的高階

手機和耳機，大多採用這兩間的微機電麥克風。預計到 2027 年，用在手機和耳機上的微機電麥克風將達 80 億顆。



資料來源：Yole (2020)

圖 2.1.28 微機電麥克風廠商市場

二、生醫檢測及醫療應用

微機電技術在生醫方面的應用已是不可或缺的基礎製造技術，其主要原因是微機電技術可以製作出與體內細胞及組織相同尺度之微結構、微流動系統、感測器、及致動器等，提供符合人體體內細胞及組織的特徵尺寸，使得在此微尺度下的物理及化學機制可以進行操控，達到在體外可以重現與體內相近之生化與物理的生理環境及刺激，或作為操控核酸或抗原檢測之操控裝置，在體內亦可於提供所需之各種生化與物理的刺激或監測功能。

(一) 微機電技術在生物檢測及醫療應用於 2000 年後的主要趨勢

簡述如下：

1. 資源匱乏的醫療應用(LRS, Limited Resource Setting)

此領域為可應用在低能源普及率、醫療資源缺乏、醫事人員短缺的資源匱乏地區所需之診斷裝置，此類裝置的特徵有兩種，其一為使用極為簡單的操控裝置，以因應能源短缺的使用場域，或使用低能耗及輕量的裝置設計，以達到在物資缺乏的環境下使用。

2. 體外檢測裝置(IVD, *In Vitro* Diagnostic Device)

此應用可在非中心實驗室或大型醫院中心實驗室使用，此類裝置的應用情境多元，主要優勢在於此應用情境較無能源限制的問題，而且應用範

圍廣，包含可在一般診所使用的體外診斷裝置(POLD, Physician Office Lab Diagnostics)。它主要的目的是讓病人在就診期間，醫師可以在診所內直接進行檢查，能當場做出更為準確的診斷及投藥動作；第二種是可在病房、開刀房、或加護病房使用的定點照護系統(POCT, Point-of-care testing)，以即時提供醫師做為診斷或對疾病解決對策之依據；第三種為病人在家進行自我檢測的裝置(Home Patient-self Testing, PST)。可分為兩種形式，一種是可全自動化操作之小型裝置，另一種是操作簡易的裝置。

3. 微生理裝置(Microphysiological System)

微生理裝置的前身為器官晶片，其主要的開發的起因有二，一是由於動物實驗所使用的動物模型屬於不同物種，故仍具有基因上的差異，因此許多藥物毒性或副作用在人體實驗時才會被發現，或在上市後才陸續發現有副作用後被勒令下架。二是由於使用人類細胞在培養皿中所做出來的實驗，是屬於以二維形式所進行靜態培養，與體內以血管網絡進行三維組織的新陳代謝機制有相當大的差異，所以所獲得的實驗結果與實際人體內狀況仍有相當的差距。而使用微機電技術製造，可將細胞進行空間排列，並使其產生組織或器官功能，並且，讓可以操控時間及空間之生化或物理變化的微流體裝置相繼被發展出來，因此促成此領域更益發廣泛地包含了器官晶片(Organ-on-a-Chip)、類器官晶片(Organoid-on-a-Chip)、多重器官之人體晶片(Human-on-a-Chip)、疾病晶片(Disease-on-a-Chip)等。

4. 植入式裝置 (Implantable Device)

此種植入式裝置對微機電製程精度及技術的要求非常高，多為智慧型微型裝置，尺寸非常小，以低程度的侵入式植入方式，提供病患進行藥物治療、替換或補充生理所需之功能之機能、或提供病患受損患部的神經刺激與大腦訊號的通訊及感知。

5. 穿戴式裝置 (Wearable Device)

微機電製造技術亦是推動穿戴式裝置發展的主要科技之一，其發展的主要推動背景之一是全球大多數已發展國家已進入老人化社會，且這些高智齡人口的健康意識抬升且多具有高度的教育程度，對於操作智慧型裝置能有一定程度的了解，因此願意主動進行自我健康偵測，以隨時觀察身體健康狀況，如可黏貼在皮膚上的汗液感測器、心律及血壓監測裝置等。其二為提供與虛擬實境的實際體感連結裝置，提供使用者在穿戴如虛擬眼鏡時，能提供使用者更為實際之觸覺致動及感受，主要應用在外科手術的虛擬訓練以及電競產業上。

6. 標靶藥物之奈米液珠產生器 (Nanodroplet Generator)

標靶藥物是目前在癌症治療上的一項突破性治療方法，其中一項技術是利用高分子材料包覆藥物，或在奈米氣泡表面植入藥物，以靜脈注射的方式或是組織注射的方式植入體內。再利用高分子材料上所植入的抗體抓取癌症病區的特定組織，達到專一性的目的，之後再使用超音波將腫瘤區的奈米液珠打破，或以生物可降解的高分子材料將藥物釋放出來。而目前業界生產的奈米液珠尺寸較不一致，分布曲線較為扁平，因此在實際應用上的效果有所限制。而以微機電技術所設計及製作的奈米液珠產生器，提供了一個次世代解方，其可提供尺寸具極高同調性的奈米液珠，將成為標靶藥物研究開發的新基礎。

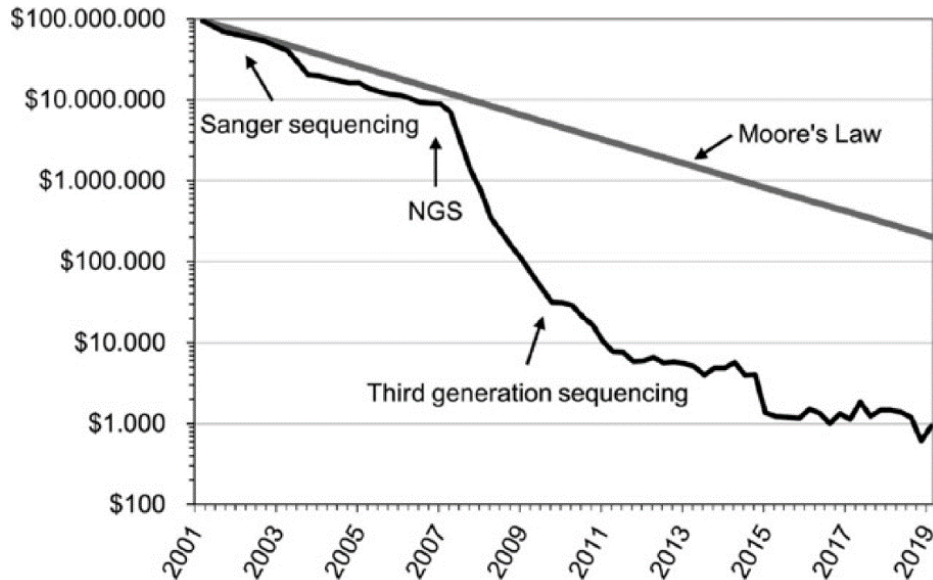
(二) 微機電技術於生醫檢測及醫療的應用典範產品及技術

由於微機電技術是推動各式裝置的主要基石，有相當可觀的研究成果發表、專利、以及成功的產品案例，在此我們從人體最小的核酸檢測、可模擬人體組織及器官之微生理系統、可植入式的微機電裝置、到可穿戴於體表的穿戴裝置等各層級應用，進行介紹。

1. 人類基因體序列分析技術 (Human genome sequencing) 應用典範

美國國家衛生院(NIH, National Institutes of Health)旗下的國家人類基因組研究所(National Human Genome Research Institute)在 2004 年進行一項大型的人類基因體序列分析技術的推動計畫(\$1,000 genome programme)，主要是推動基因序列的分析技術的發展，以期將當年高成本及高專業人力需求的基因序列分析技術，發展出技術門檻低的低成本且快速之人類完整基因序列的分析技術。在大量的經費投入之下，以及高達 97 個世界級實驗室及高科技公司的參與下，有許多新型的基因序列分析技術被開發出來，人類基因體序列分析所需成本在 15 年間從十萬美元降到只需約一千美元，且在 2007 年所需的分析成本快速下降，如圖 2.2.1 所示，此一驚人的發展速度比 IC 電晶體所遵循的摩爾定律(Moore's law)所指出的每兩年運算能力會加倍的預測還快上好幾倍，在短短的 15 年間即達成目標，且具有超過 30 篇重要期刊論文發表，並有高達 1225 篇以上的專利獲得核准，可見此技術的重要性。此技術的發展提供生醫界一項重要的基本技術，讓基因分析技術成為基因診斷的重要工具，疾病成因研究的基礎，以及核醣核酸生物標誌的開發方法。在 2019 年新冠肺炎疫情爆發後。亦扮演各國主要的病毒基因體定序的主要方法，並用以判定出新冠肺炎變異株序列，是為醫界在此次疫情中之所以能如此快速的進行應變及預防的主要核心技術。由

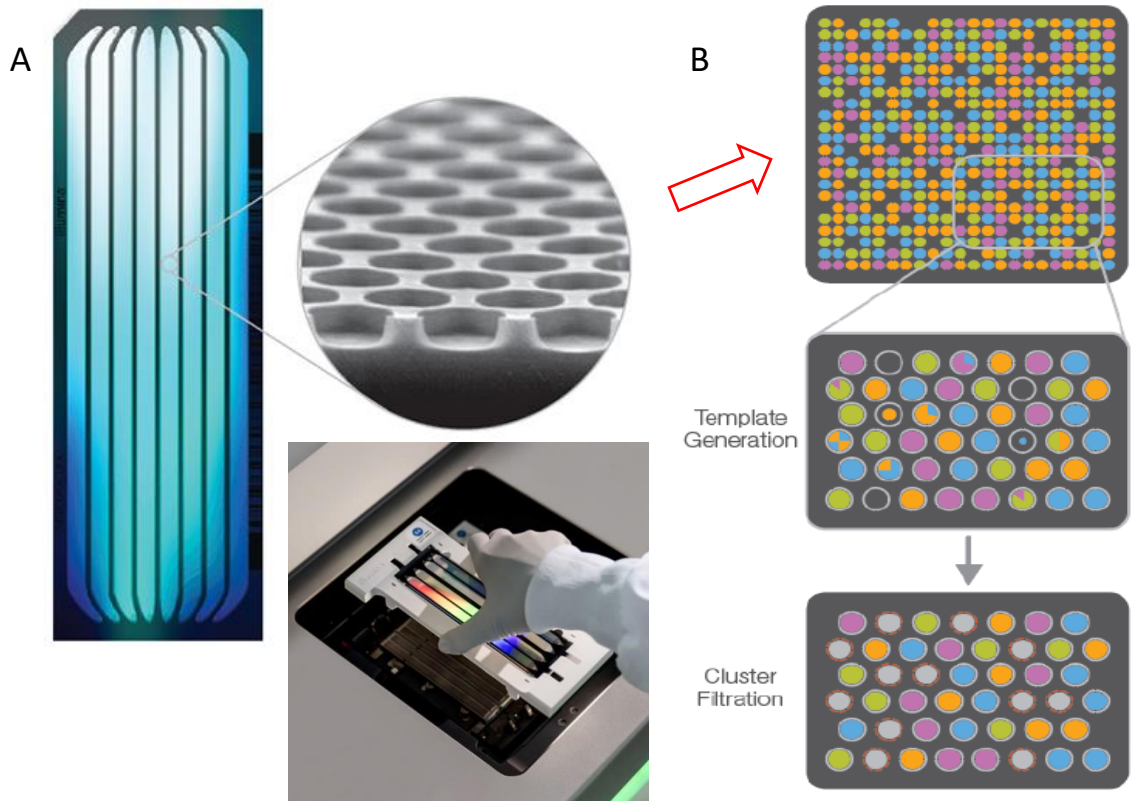
Market Research Future 公司於 2023 年的市場調查結果可知，此技術的產業價值於 2023 年的報告中指出，其在 2022 年的市值已達 112.3 億美元，並預測在 2030 年可達 442.3 億美元，五年間的複合成長率將達 18.7%，可見次世代基因定序在人類醫療發展上，已是不可或缺的一項黃金標準技術。



資料來源：Nature (2022)

圖 2.2.1 人類基因體序列分析技術成本演變之發展分析圖表

此技術之所以能加速的成長，是在 2007 年所提出的次世代定序技術 (Next-generation sequencing) 的基礎技術，其主要概念是將基因序列進行分段，製作出樣本庫，再將其進行擴增及定序反應，最後再進行數據分析。目前美國的 Illumina、Thermo Fisher Scientific, Inc.、Becton Eurofins Scientific、GenScript、PerkinElmer、Pacific Biosciences of California, Inc.，印度的 Genome Life Sciences、Xcelris Genomics，及瑞士的 F. Hoffmann-La Roche Ltd. 為目前主要提供次世代定序設備的公司，其中以 Illumina 為最成功的典範，其全球市占率達 90%，圖 2.2.2 為其主要核心裝置的設計，而此次世代定序技術之所以可以成功的是仰賴微機電的玻璃製程技術，圖 2.2.2 (A) 所示為 Illumina 其中一種次世代基因序列定序裝置，其結構為在一極薄的玻璃基板上蝕刻八個流道系統，且流道系統下方有奈米等級深度的微孔陣列，此每個微孔陣列將隨機植入片段的基因序列，因此可以建立相當可觀的基因片段樣本庫，圖 2.2.2 (A) 及 (B)，最高可處理高達十六兆位元組 (16 Tb) 的數據，也就是可以處理完整人類的整體基因序列，且在 13 至 48 小時即可使用 Illumina 的全自動化設備完成實驗步驟、定序、及分析。此次世代基因定序是為微機電系統技術在生醫應用上最為成功的應用典範。



資料來源：<https://www.illumina.com/> (2023)

圖 2.2.2 Illumina 公司所開發的次世代基因定序裝置(A)，及基因片段樣本庫圖概念圖(B)

2. 微生理系統(Microphysiological System)應用典範

美國食品和藥物管理局(US Food and Drug Administration, FDA)在 2022 年底通過一項法案(H.R.2617)，在此項法案明定在新藥開發中，進入人體實驗前的基礎研究實驗證據，可使用非動物實驗的結果進行申請，包含器官晶片(Organ chips)及微生理系統(Microphysiological systems)、數值模擬模型、以及 3D 列印的生體模型等的實驗研究證據。歐盟目前也正向同一方向進行修法，動物實驗將不會是開發中藥物進入人體實驗前所必須提供的實驗數據。

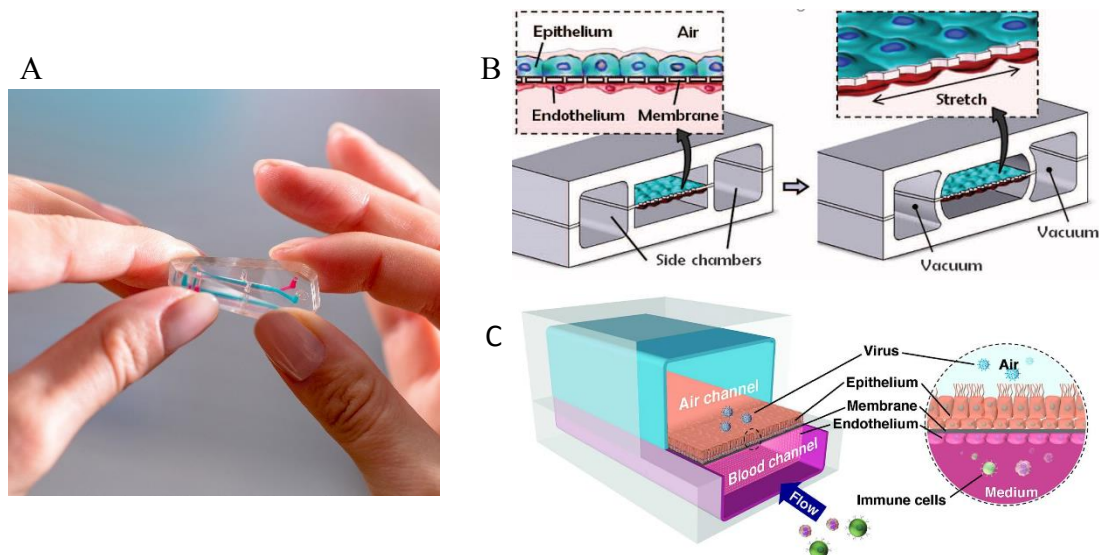
而推動此項法案的進展有幾項重要驅動因素，其中一項主因是在近年的統計中發現 30%發展中的藥物在人體實驗中因嚴重副作用而被迫停止，其他開發中的藥物則有高達 60%因不具有功效而告終，而且總共有高達 95%藥物在人體實驗的階段失敗。

在此研究中凸顯出目前學界跟業界使用培養皿及動物實驗進行藥物前研究無法提供足夠可靠之生物模型，因此，所獲得的實驗結果與人體實

際狀況有相當大的出入。動物實驗的根本問題是所用的動物基因與人類基因雖相近但仍有差異，因此無法確切探討藥物對人體器官的實際功效或毒性。而培養皿的實驗方法雖然可以使用人類細胞進行實驗，但因是靜態培養，細胞基本上是以浸泡的方式進行二維培養，無法提供像體內由血管網絡進行養分、氧氣、及生物訊號的傳遞，以及將新陳代謝的產物帶走的機制，且細胞多為單層方式分布，在接受藥物的質傳效應相對於體內由血管以擴散及滲流提供的方式有相當大的差異，因此所測試出實際藥物濃度與功效的關係與實際人體實驗的結果會有根本上的差距。

另一項讓微生理系統備受重視的是 2019 年所爆發的新冠肺炎疫情，在疫情爆發後全球的業界及學界皆投入研究能量開發可以治療新冠肺炎的 SARS-CoV-2 病毒的藥物，但在初期的研究中雖於培養皿中有發現幾種藥物對此病毒具有療效，但在進入動物實驗以及之後的人體實驗後發覺所發現的藥物並不具有療效，因此造成在短期內發展出可對抗新冠疫情藥物的困境。而當時由哈佛大學 Wyss Institute 的 Ingber 教授研究團隊所開發的人體氣管晶片(human airway chip)提供一個更為接近人體肺部的模型系統，可以模擬病毒於人體內的傳染途徑，在疫情困境中扮演重要的角色，提供篩選新冠病毒藥物的一項重要臨床前研究的平台。

而此人體氣管晶片(human airway chip)是目前微機電系統技術在生醫檢測應用上最具代表性的應用典範。目前已是全球最大的微生理系統公司 Emulate，圖 2.2.3(A)為 Emulate 的裝置照片，它使用軟微影技術的微機電技術製程製作出具有彈性的微流道裝置，其具有由兩個三流道矽橡膠夾住一層十微米厚的薄膜，且此薄膜上具有三至十微米通孔陣列，如圖 2.2.3(B)的示意圖所示。此微生理裝置的優勢有二，中間具微孔陣列的薄膜的兩面可以分別種植不同種類的細胞，而此薄膜中的微孔陣列提供兩側細胞訊號傳遞及交互作用之途徑，而各自的流道則可以通入人體器官組織相對應的體液或氣體，如人體氣管晶片中將其中一面植入肺泡之外皮細胞並通入空氣，另一面植入血管之內皮細胞並通入血液或培養液，如圖 2.2.3(C)所示，再藉由將兩側流道進行週期性氣抽真空，讓中間薄膜層產生週期性形變，如此不但可在體外實際模擬出人體肺泡與血管的生理環境介面，並提供人體在呼吸時肺泡週期性膨脹之機制，提供近似病菌進入人體的路徑，可以用以探知病毒感染途徑，以及作為藥物篩選及開發之工具，或是做為免疫療法的研發平台。



資料來源：<https://emulatebio.com/> (2023)

圖 2.2.3 Emulate 微生理系統裝置(A)，及基本功能示意圖(B-C)

Emulate 的這項發明體現了微機電製程技術在微生理系統所扮演的角色，其提供可製作出人體器官或組織的基本工作單元所需之特徵尺度，多存在在百微米至微米等級，且可用以製作出複雜之人體三維結構以及複雜之流道結構，以提供微生理系統操控裝置中的生化及物理性的微生理環境。Emulate 及其應用團隊已使用此裝置成功地在體外製造出多種體內之人類器官裝置，包含腦部血管與神經介面之腦部晶片(Brain-Chip)、結腸腸道與血管介面之腸道晶片(Colon Intestine-Chip)、十二指腸腸道與血管介面之腸道晶片(Duodenum Intestine-Chip)、腎臟近曲小管與血管介面之腎臟晶片(Kidney-Chip)、肝臟細胞與血管介面肝臟晶片(Liver-Chip)等。Emulate 裝置的優勢在於薄膜兩側細胞種類是可以選擇性的植入，且可以使用人體細胞，排除以動物模型實驗時，所面對的基因上的差異。而且，使用此一薄膜式的介面設計，可於體外提供更為接近人體的血管與不同器官進行傳遞之介面，即提供研究外來病原體或藥物進入各種器官之體外膜性。而微機電製程技術是促使此微生理系統成功的一項最重要的基石。

微生理系統是目前美國及歐盟的重點發展科技，發展非常快速，有相當可觀的業界投入研究資源及人力，從 Market Data Forecast 的報告可知，器官晶片於 2023 的市場價值將達 8.22 千萬美元，且預測到 2028 年將上升到 3.88 億美元，從 2023 年到 2028 年五年間的複合成長率將達 36.4%，其上升的速度將相當的可觀。而微生理系統有別於以往傳統的層狀堆積的製造技術，是需要具有製做三維結構的微型裝置的製造乙級組裝，並且須能進行微環境進行操控，在製造上有相當的挑戰，若我國的微機電製造及系統技術在此次全球發展的趨勢之中能佔有一線的地位，將可發展成為我國

一項全新的產業鏈。

3. 汗液檢測穿戴裝置(Sweat Analysis Wearable Device)應用典範

穿戴式裝置是一種非侵入性的生理健康監測裝置，由於其非侵入式的穿戴方式，生理健康監測裝置將可從本由醫療專業人員使用，進一步擴展到一般民眾使用，一般民眾使用者可以在醫療院所以外的地方，持續監控身體健康狀況，藉之可提供回到醫院就診的依據，讓醫師掌握評估病人病發的參考數據，並可做為病人病發前的一種預警系統。穿戴式感測器亦已佔有一定的市場，由 Mordor Intelligence 針對穿戴裝置的市場產值的分析報告中指出，穿戴式感測器在 2023 年的產值已達 38 億美元，到 2028 年即可上升到 69.7 億美元，五年間的複合成長率將達 12.41%。

目前市場上穿戴裝置以心律、體溫、血壓、姿態及動作分析為主，而對於體內的狀況則以汗液感測為主要的監測方法，這是目前穿戴裝置中可以監測體內健康狀況到分子等級的感測器，此裝置以柔性基材為主，內部具有微流道設計，以將汗液收集導入感測區域，而感測方法多以電化學的方式進行量測，可監測汗液中各種離子，表 2.2.1 綜合了目前汗液穿戴裝置可以監測到的各種體內健康與疾病資訊，包含可監測運動員、學生、救難人員、軍事人員在戶外活動時是否有脫水、中暑現象的鈉鉀離子濃度變化；糖尿病病人的葡萄糖濃度；壓力所造成的賀爾蒙變化；癌症治療中所影響的免疫反應監測；藥物對心臟疾病控制的影響；患有腎臟功能障礙的監測；酒精成癮病人體內酒精濃度監測；皮膚病及傷口復原中的酸鹼值變化；帕金森氏症病人的多巴胺濃度指標；以及體內新陳代謝機制是否從無氧轉成有氧之新陳代謝等，因此汗液感測器是目前穿戴裝置中一項重點發展，可以非侵入的方式提供更多體內健康及疾病資訊，讓使用者可以不在醫療院所中的大型實驗室或中心檢驗室便得進行自我健康偵測，以期能及早預測疾病發生，或提醒病患可能即將發病，以便及早改變作息及活動或即時投藥來因應，以降低發病風險，避免急性發病的可能性，並可爭取時間將病人在發病前送回醫院救治。

表 2.2.1 汗液感測器可監測到的身體健康資訊及種類

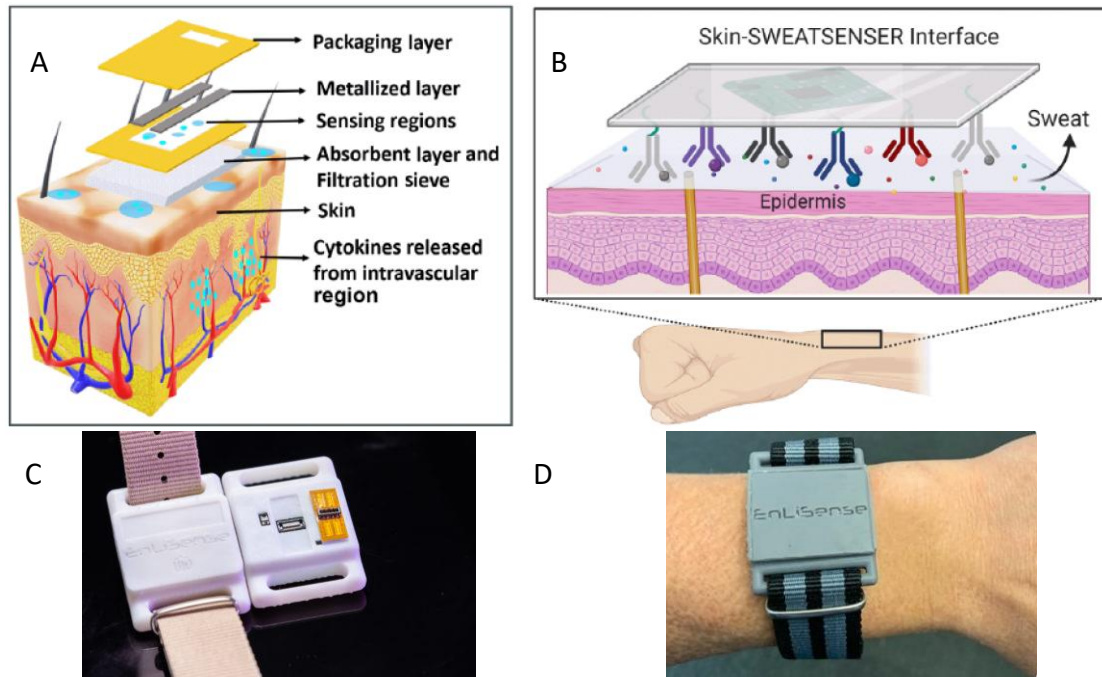
Analyte category	Analyte	Health condition
Electrolytes	Na ⁺	Dehydration, hyponatremia, electrolyte imbalance
	Cl ⁻	Dehydration, cystic fibrosis
	K ⁺	Hypokalemia, muscle cramps
	Ca ²⁺	Myeloma, cirrhosis, renal failure, acid-base balance disorder
	NH ⁴⁺	Shift from aerobic to anaerobic metabolic conditions
	PH	Pathogenesis of skin diseases, wound healing
Metabolites	Glucose	Diabetes
	Lactate	Shift from aerobic to anaerobic metabolic conditions
	Alcohol	Inebriation
	Uric acid	Renal dysfunction, gout
Drugs	Caffeine	Coronary syndrome, hypertension, Depression
	Levodopa	Parkinson's disease
Trace metals	Zn ²⁺	Stress and immune system-induced muscle damage
	Cu ²⁺	Rheumatoid arthritis, Wilson's disease, cirrhosis of the liver
Other analytes (hormones, cytokines, proteins, etc.)	Interleukin 6	Insulin activity, immune responses in cancer therapy
	Cortisol	Stress
	Tyrosine	Metabolic disorders, tyrosinemia
	Neuropeptide Y	Stress

資料來源：Microsystems & Nanoengineering (2023)

汗液感測器是較為新興的穿戴式裝置，目前已有多家新創公司成立，在此介紹的汗液穿戴式裝置應用典範公司 EnLiSense，其核心技術如圖 2.2.4(A)及(B)所示，其製造的汗液穿戴式裝置是以微機電製程技術製造出奈米氧化鋅薄膜層，並在氧化鋅上面接上可以抓取不同帶電離子、代謝分子產物、藥物、微量金屬、賀爾蒙及蛋白等抗體，此薄膜層作為具有專一性的汗液感測材料，並貼附在一層孔洞材料上，下方並有一層吸汗材料，外部並有一個微流道結構，以引導汗液流到感測區域，再由電化學反應將待測生物標誌進行定量及定性的量測，圖 2.2.4(C)及(D)則展示了 EnLiSense 汗液感測器及其穿戴方式。EnLiSense 已將此汗液感測技術應用在葡萄糖及皮質酮的量測，可作為使用者飲食及運動強度的參照依據。也可量測膠質纖維酸性蛋白及介白素，用以作為創傷性腦損傷患者在受傷後的免疫反應監測以及其他免疫反應之應用。EnLiSense 在新冠肺炎的疫情期間亦使用其汗液感測器開發出可監測感染者有死亡高風險前體內所產生的免疫風暴(細胞激素風暴)，此應用不但降低病人的負擔，亦可降低醫療人員的風險。

微機電系統技術在穿戴式汗液感測器的製造上亦為重要的基石，除了奈米感測材料及電極的製造外，亦須與軟性電子進行結合，才能製造出具

有穿戴舒適性的汗液感測裝置，由目前穿戴式汗液感測器的應用範圍快速擴展及發展，微機電製程技術及系統將會是促進穿戴式汗液感測器普及化的一項重要資源。



資料來源：<https://enlisen.com/> (2023)

圖 2.2.4 EnLiSense 穿戴式汗液感測器的設計(A)，感測機制(B)，整體裝置設計(C)，及穿戴方式(D)

接下來將介紹微機電植入裝置(MEMS Implantable Devices)的相關應用典範。

在醫療領域使用的設備與一般消費性產品不同，往往較不隨經濟環境和消費者情緒起伏的影響。其主要原因是，無論經濟發展狀況如何，醫療服務始終是需要的，並且不受可自由支配的消費支出的驅動。另一方面，由於全球人口老年化的趨勢帶動醫療服務需求增加，直接導致經濟負擔增加，在已開發國家更為顯著。因此，如何尋求技術解決方案來降低成本並提高民眾獲得醫療服務的機會，是現今政策制定者、醫療保險公司、醫生和研究人員主要尋求的解方。

微機電系統在微型植入裝置上的應用已有相當成熟的發展，且其在醫療上的應用不斷的快速增長，在醫療感測器、分析儀和診斷工具中的應用正在不斷增加，因為它具有以中低成本進行批量生產的固有能力，同時保持可靠性和功能性。

由 Applied Market Research 公司在 2022 年的報告已公開的市場調查結果指出，植入裝置的產業價值在 2020 年的市值達 918.69 億美元，並預

測在 2030 年可達 1.79 千億美元，九年間的複合成長率將達 7.2%。

微機電系統及技術在智能醫療植入物的開發中具有顯著的優勢，因其具有以下特點：

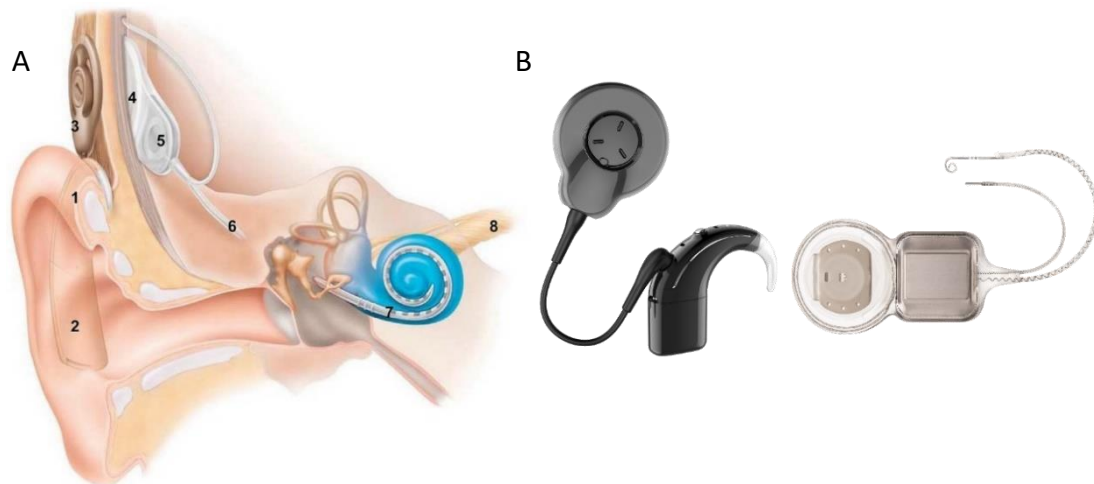
- (1) 尺寸極小：允許進入人體內高度狹窄的空間，並使植入物的侵入性最小化。
- (2) 高精度及高靈敏度：提供高度感知或調節生理的功能。
- (3) 量產可行性：有效降低醫療成本。
- (4) 生物相容性及可靠性：滿足體內長期植入的嚴格監管要求。

以下介紹四種微機電植入裝置的應用典範，包含人工耳蝸助聽器(Cochlear Implant)、腦部深部刺激器(Deep Brain Stimulation)、脊髓刺激器(Spinal Cord Stimulation)、及植入式輸液泵(Implanted Infusion Pump)。

4. 人工耳蝸助聽器

人工耳蝸助聽器使用微機電製程技術製造結構精細、高柔性、且具生物相容性的微型電極陣列，該電極陣列可捲曲，而被妥善地設置在人體耳蝸內部，藉產生區域性電刺激訊號，以替代耳蝸內損壞的內耳纖毛細胞所負責之聲波轉換成神經訊號的功能。除微電極陣列之外，此系統亦包含複雜的電子設備，用於接收並運算所接收的聲音訊號，將音訊轉為電刺激協定訊號，並以無線方式傳輸到植入的電極陣列中，再將音訊轉為電刺激訊號，激發耳蝸內剩餘的聽覺神經，以重建聲音的感知能力，圖 2.2.5(A)及(B)為其基本架構圖。

圖 2.2.5(A)所示的裝置可將聲音轉換為傳遞至聽覺神經的電脈衝，耳朵(1)外部包含耳掛和電池盒的耳後式外部處理器(2)，將麥克風所接收到的聲訊，轉換為數位信號並編碼，以無線傳輸發送至耳機(3)的天線，此耳機是通過磁鐵固定在耳後皮下的內部接收器的外部(4)。體內具有放大電路(5)將接收到的訊號解碼並放大，將其轉換為電流，再經由穿過耳蝸的電線(6)傳到導線末端的電極陣列(7)，達到刺激耳蝸的中樞神經系統的聽覺神經(8)，以重建聽覺。



資料來源：www.cochlear.com (2023)

圖 2.2.5 人工耳蝸助聽器裝置示意圖(A)及產品(B)

至 2022 年底，人工耳蝸是最成功的神經假體裝置，已經達到協助重建一百萬完全或部分耳聾病人的聽力功能的里程碑，且未來每年將預計增加六萬五千個人工耳蝸。然而，目前全球仍約有十五億人患有不同程度的聽力損失，其中美國佔有 4800 萬人，且在全球老年化的趨勢持續加重的狀況下，到 2050 年全球將有 25 億人會有聽力障礙的問題(WHO, World Health Organization, 世界衛生組織)。由於年長者的聽力障礙相對高，全球持續增長的高齡人口將會是聽力障礙主要市場驅動力，因此，人工耳蝸助聽器的市場將持續增長。從 2021 年 6 月發表在 JAMA Network 的研究中指出，在取樣 2956 名美國老年人中有 973 人(33%)聽力正常，1,170 人(40%)有輕度聽力障礙，692 人(23%)有中度聽力障礙，121 人(4%)有重度聽力障礙。因此，隨著老年人口的增長，對人工耳蝸的需求預計也會增加。此外，聽力損失或聽力困難是老年人的常見問題。根據美國國家耳聾和其他溝通障礙研究所(NIDCD)於 2022 年 3 月所發布的報告，美國 65 歲至 74 歲之間的人口中約有三分之一患有聽力損失，而此等患有聽力損失的人口中將近一半為 75 歲以上的高齡人口。因此，老年化人口中的聽力障礙的高患病率預計是刺激對人工耳蝸的需求並推動市場擴張的主要推動力。

正如著名盲聾作家、講師、演講家、及社會倡導者海倫·凱勒(1880-1968)所說的「非人的沉默所造成分離和疏遠」，以電流直接刺激完全失聰者的聽覺神經，人工耳蝸是目前唯一可以打破這種與人分離的最佳途徑。此裝置的成功是經由相當悠久、傑出和有趣的歷史，包含工程師和醫生之間的高度互動與交流，以及實驗、監管標準、以及道德之間的複雜平衡而達成。

人工耳蝸的發展是從二十世紀初開始，從聽覺生理學的研究中解釋中耳如何感知和放大聲音振動，以及內耳耳蝸如何根據頻率將傳入的聲音分

離成 20Hz 至 20KHz 不同聲音強度的神經元信號，並沿著耳蝸以不同的音調頻率排列，使得每個位置的聽覺神經負責專一的窄帶的聲音頻率，它們再將訊號從耳蝸傳輸到大腦的聽覺皮層，然後將訊號整合到大腦的聲音感知區域。在 20 世紀中以來，醫生是將早期研究成果轉化為臨床實踐的驅動力。一開始是使用單個電極插入鼓階（耳蝸內的三個腔室之一），並用電刺激產生聲音的感覺。這種方法完全繞過了從中耳到耳蝸內的內耳纖毛細胞將聲波轉為電訊號的聲學轉換生理機制，成功恢復了全聾患者的聲音感知功能。然而，這些早期單電極系統的人工耳蝸植入物，在二十世紀的七零年代遭到了主流科學界的強烈懷疑甚至抵制。與正常耳蝸中的三千個內耳纖毛細胞相比，單個電極無法提供類似於實際聲音刺激所產生的正常神經模式及聲音感知水平。

研究人員很快就發現，使用不同深度的耳蝸電極，並將每個電極刺激以特定的聲音頻率進行刺激，可以有效地改善及重建聲音感知功能。在這一時期，電子設備的也進入快速小型化和功耗降低的年代，使得運算電路能夠執行複雜的聲音處理。然而，當時電極陣列是在顯微鏡下以手工進行焊接最小線徑至 25 微米，並在其周圍注射矽膠。由於是以手工組裝的陣列，其尺寸較大，且容易傷害任何殘餘聽力，並已證明會降低聽力水平及逐漸降低此電擊陣列的性能。此外，因電極的尺寸而限制了陣列數量為約二十個，造成在辨別高音頻的解析能力受到限制。另一方面，此手動組裝的電極陣列因缺乏自動化製造技術，成本極高，價格也相對昂貴。

在引入微機電製程技術後，電極陣列的數量大量提升，有效增加音調特異性，並因減小陣列尺寸而有利於保留殘餘聽力，更允許更深的插入耳蝸中以提升可重建之音調範圍。微機電製程技術藉由自動化製造，成功地將成本降低，並提供顯著的市場優勢。由微機電製程技術所製造出的電極陣列提供了足夠的機械強度，使其可隨著耳蝸的螺旋結構深入末端，且可定位在受體細胞的位置上，並減少插入過程中所造成的創傷。且微機電電極陣列亦提供了多工的電刺激功能以達到高密度刺激的模式。

除了製程技術進步之外，政府內部的政策制定者和創投也在這個複雜且精密的系統的發展過程中發揮著至關重要的作用。例如，在澳大利亞生產力部的資助下，墨爾本大學與 Nucleus Limited 公司於 1979 年簽訂合作協議，生產並銷售 22 電極陣列的人工耳蝸裝置。在 20 世紀 80 年代中期，美國國衛院通過 UCSF 和墨爾本大學設備開發(1RO1-NS21027)補助案，並主辦第一次共識會議，凝聚「多通道植入物可能具有一些優越性」的共識，加快了多電極人工耳蝸植入裝置的接受度。由於澳大利亞政府的不懈支持，人工耳蝸的市場一開始由澳洲 Cochlear Limited 主導推動，在過去四十年

中售出六十五萬個人工耳蝸(Cochlear Limited, 2021), 成為最大的人工耳蝸系統製造商, 達到 50%以上的市占率。第二大公司同樣是由澳洲的 Med El 公司所維持, 市占率約為 25%。第三位為美國的 Advanced Bionics Corporation, 市占率為 20%以下。其他製造商規模要小得多, 佔約 5%, 包括 中國 Nurotron (杭州)、法國 Oticon Medical (原 Neurelec)、中國 Listint 等。

這種只有少數公司佔據接近 95%市場的現象說明醫療器械高門檻的重要性, 其困難點是由於人體長期植入裝置的嚴格監管要求, 以臨床試驗證明安全性和有效性所需的投資是相當可觀。這對於企業來說既是挑戰也是機遇。一旦跨過障礙, 競爭就會很少甚至不存在, 從而使公司能夠獨享市場一段時期, 不但可快速回收投資成本並獲得可觀的利潤率。

以下總結人工耳蝸助聽器的應用典範可以提供我國微機電產業在生醫應用領域的寶貴經驗：

1. 確認是現今尚未滿足的臨床需求：就人工耳蝸而言, 需要解決不斷增長之老年化社會所伴隨的嚴重聽力障礙的族群增加, 且此等患者無法用任何其他方法與以治療的問題。
2. 技術優勢必須有完整的智慧財產權保護：其中包括使用先進的電子設備和演算法, 以及應用微機電技術實現人工耳蝸的極度微小型化需求。
3. 開發資源和監管途徑必須同時到位：對於人工耳蝸來說, 澳大利亞政府堅定的財政支持、監管機構的早期參與、以及創新理念的建立, 使得 Cochlear Limited 可以享有 50%的市占率。

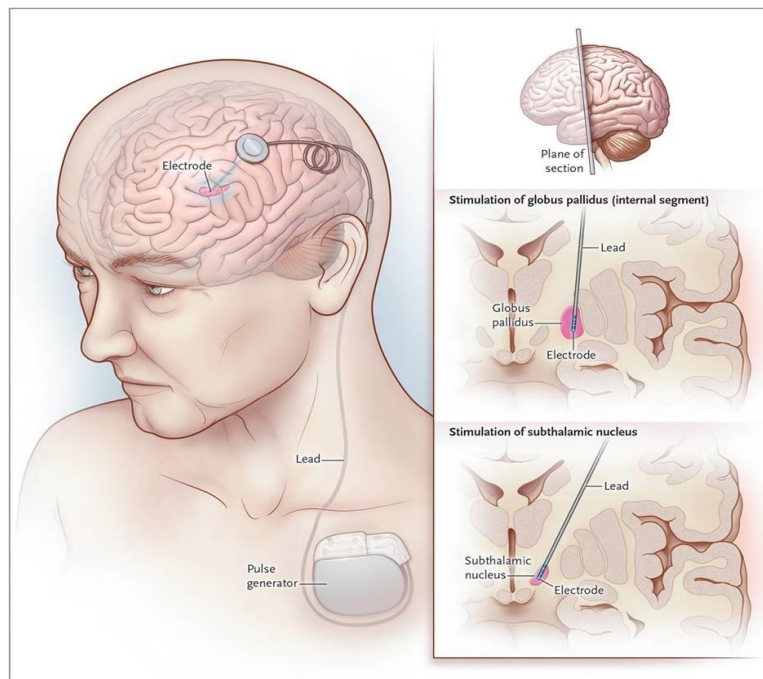
最後, 值得注意的是, 為了在競爭中保持領先地位, 產業界必須不斷創新、並推出新技術和新產品。例如, 2022 年 1 月, Cochlear Limited 公司獲得美國食品和藥物管理局(U.S. FDA)批准其裝置在治療單側聽力損失(UHL)或單側耳聾(SSD)的應用, 預期將會引起下一波市場的擴增, 可覆蓋更廣泛的客戶群。

5. 腦部深層刺激

帕金森氏症是一種慢性神經退化性疾病, 具有運動和非運動神經症狀, 目前的治療方法以藥物及手術治療為主。在 1997 年至 2017 年間, 美國帕金森氏症的發病率增加一倍, 且預估到 2037 年, 帕金森氏症的病例數將達到 164 萬。而目前腦部深層刺激技術已被多個國家、國際指引委員會、及專家團體的認可, 對特定症狀, 如肌肉震顫(tremor)、運動障礙(dyskinesia)、

開關波動(on-off fluctuations)、關閉時間(off time)等病徵的首選治療方法。因此，腦部深層刺激技術已被多個專業協會納入最佳建議治療方法。

腦部深層刺激技術是一種神經外科手術，是為一種以微機電製程技術製作的神經刺激器的醫療設備，如圖 2.2.6 所示。此種裝置透過植入的電極向大腦中的特定目標（腦核）發送電脈衝，以治療運動障礙。腦部深層刺激技術在 1997 年首次被美國食品和藥物管理局批准用於治療自發性震顫和帕金森氏症。此後，研究陸續發現腦部深層刺激技術可有效治療其他神經系統疾病。此技術在 2003 年獲准使用來治療肌張力障礙，並於 2009 年被批准應用強迫症的治療，2018 年亦被核准使用在癲癇治療。目前腦部深層刺激技術仍在臨床試驗研究的階段，以作為治療重度抑鬱症等各種情感障礙及慢性疼痛的潛在療法。它是少數允許盲法研究(blinded studies)的神經外科手術之一(www.fda.gov)。值得注意的是，美國食品和藥物管理局所批准的是針對特定疾病的治療，因此，在不同的疾病使用相同的設備和治療方法皆須單獨獲得批准。然而，針對不同神經系統疾病重新開發腦部深層刺激設備的開發成本可能很小，因此對於公司擴大腦部深層刺激系統的用途是一項非常有利的投資。



資料來源：www.medtronic.com (2023)

圖 2.2.6 Medtronic 深部腦刺激(DBS)系統

圖 2.2.6 所示的系統，使用一個類似起搏器的小型設備(脈衝發生器)，放置在胸部的皮下，通過非常細的導線進入腦部，此導線植入丘腦底核或蒼白球內段，並將電刺激訊號發送到控制運動的大腦區域。

目前已有大量研究文獻證明腦部深層刺激技術這種手術優於單純藥物治療。一項為期 10 年的長期研究指出，腦部深層刺激技術可以有效地讓帕金森氏症患者進行日常生活活動，並在研究期間保持穩定，且超過 90% 的患者對結果感到滿意。此外，此治療方法對於自發性震顫患者來說也是一種高效的治療方法，通常可以使震顫減少 80% 或更多。目前，使用腦部深層刺激技術治療手部震顫已有非常好的療效，此技術亦可改善其他身體部位的震顫，例如頭部、聲音和腿部。而患有原發性（家族性）震顫的患者，若對至少 1 到 2 種藥物沒有足夠的反應，並且震顫損害了他們的生活品質，則腦部深層刺激技術將是良好治療選擇。因此，當運動障礙醫師在對病人實施的最佳藥物治療的後，若生活品質不再可接受時，就應考慮進行腦部深層刺激技術的手術。此手術非常安全，設備技術具有最新科技，也改善了患者的治療效果。以帕金森氏症為例，當藥物療效下降時，腦部深層刺激技術手術能有助於控制帕金森氏症的一些運動症狀，如顫抖、運動遲緩、運動障礙、和僵硬。

腦部深層刺激技術的電極是針對症狀植入大腦中，目前可控制下列症狀：

- (1) 蒼白球內部的腦部深層刺激可減少運動障礙：這使得患者能夠服用足夠量的藥物（尤其是左旋多巴），從而更好地控制症狀。
- (2) 丘腦底核的腦部深層刺激可直接減輕帕金森氏症症狀：這可以減少抗帕金森氏症藥物的劑量。
- (3) 橋腳核的腦部深層刺激可能有助於步態凍結障礙。
- (4) 丘腦腹中間核的腦部深層刺激可減少非帕金森氏症自主性震顫。
- (5) 伏隔核深部刺激可針對強迫症和抑鬱症。
- (6) 丘腦后區或導水管周圍灰質的腦部深層刺激可治療持續疼痛。
- (7) 同時進行丘腦底核和腦橋被蓋核的腦部深層刺激可協助對帕金森氏症患者。
- (8) 丘腦前核的深部腦刺激可應用在癲癇治療。

腦部深層刺激與人工耳蝸助聽器的發展過程相似，目前只有少數腦部深層刺激裝置的公司被廣泛接受且具有良好信譽。其中最著名的是美敦力 (Medtronic)、聖裘德醫療 (St. Jude Medical) 及波士頓科學 (Boston Scientific)。

A. Medtronic Activa™：美敦力 (Medtronic) 的首款產品於 1997 年獲得批

准，是歷史最悠久的深部腦刺激器的設備製造商。他們提供不須充電電池及可持續使用十五年的充電電池。患者亦會獲得一個患者編程器，他們可以使用該編程器在預設範圍內調整安裝在身體內的深部腦刺激器，且此裝置與 MRI 核磁共振造影相容。

- B. St. Jude Medical Infinity™(雅培):其深部腦刺激器系統具有分段電極，可以將電流精確轉向所需的結構區域，在最大限度內提高治療效果，並減少潛在的副作用。患者會獲得一台 iPod，他們可以使用它們在預設範圍內調整身體內的深部腦刺激器，其電池不可充電，此系統亦兼容 MRI 核磁共振造影設備。
- C. Boston Scientific Vercise Gevia™：其深部腦刺激器系統亦具有分段電極，可以將電流精確轉向到所需的結構區域，從而最大限度地提高治療效果並減少潛在的副作用。此系統亦具有多重獨立電流控制功能，可為每個電極提供專用電源，以精確控制刺激並細化電場的大小和形狀。患者會獲得一個患者編程器，可使用該編程器在預設範圍內調整身體內的深部腦刺激器的設定。他們提供的可充電電池，可持續使用至少十五年。該電池是現有的最小的深部腦刺激器電池。此系統同樣兼容 MRI 核磁共振造影設備。

正如人工耳蝸助聽器的發展策略相同，深部腦刺激器系統企業若想保持在領先地位，就必須不斷創新。例如，帕金森氏症患者經常會經歷症狀的逐漸變化，這可能會導致特定刺激方案的效果隨症狀演變而降低。另一個重要的發現是，隨著症狀的變化，大腦中的信號也會發生變化。因此，BrainSense™的最新一代美敦力深部腦刺激器系統可直接從植入的 SenSight™定向導線捕獲和存儲大腦信號數據。使用這些數據，主治醫生可以調整設置以實現個人化治療，確保患者獲得最佳結果。優於某些帕金森氏症手術的是，深部腦刺激器系統是可逆的。在大多數情況下，該系統可以關閉或移除，並且不會限制患者未來的治療選擇。這為不斷引入新技術提供了重要的持續發展機會。

目前全球已有二十萬八千人受益於深部腦刺激器系統的手術，治療神經系統和神經精神疾病。然而，患有自發性震顫及帕金森氏症患者受深部腦刺激器手術的比例相當低。從 2015 年一項研究中可知，目前接受深部腦刺激器系統的手術的自發性震顫患者比例為 2.90%，而帕金森氏症患者僅達 1.38%。其部分原因是並非所有帕金森病患者都適合接受深部腦刺激，可能還存在其他障礙，如成本和整體健康狀況的考量。此外，全球各地區的深部腦刺激器系統候選者選擇、大腦目標選擇、手術類型和術後實踐的

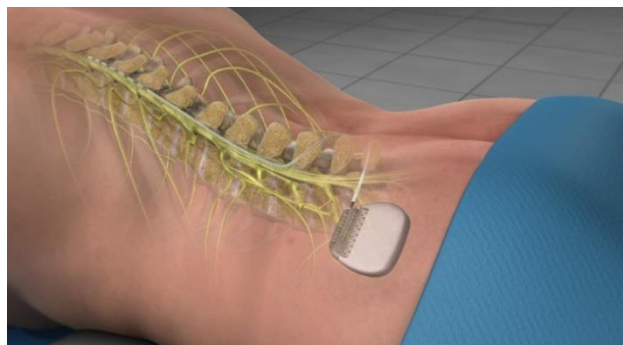
最佳方法存在很大差異。但，目前大多數深部腦刺激器系統部署的發展比例可能更高，但仍需更進一步地深入調查才能確認。無論深部腦刺激器系統的發展及應用如何，其仍是以微機電系統為基礎的一項高度發展的醫療設備及治療方法，該設備適用於潛在且龐大的高齡且服務嚴重不足的人口，其進展取決於許多社會和政治因素。

6. 脊髓刺激系統

當身體對傷害的適當反應其持續時間超過應有的時間時，就會出現慢性疼痛。這種疼痛不再保護身體免受傷害，反而變得對身體有害。慢性疼痛可能會導致工作、飲食、運動或其他日常生活活動出現問題。除了會使人疲憊不堪之外，亦會導致其他慢性健康問題，如抑鬱、體重增加，以及過度使用藥物來控制疼痛相關的問題。脊髓刺激系統可用於破壞這些疼痛信號，使大腦無法接收它們。目前，每年約有五萬名患者使用脊髓刺激系統來治療疼痛，接近每年人工耳蝸助聽器植入的數量（約 65,000 例）。

脊髓刺激系統是一種用於治療慢性神經性疼痛的微創療法。如圖 2.2.7 所示，它使用一個以微機電製程技術所製造的細長電極陣列植入到脊髓附近的脊柱中。其脈衝發生器類似於心臟起搏器和深部腦刺激器系統中使用的脈衝發生器，使用特定的脈沖模式、頻率和幅度將電刺激發送到電極陣列，直至沿脊髓的特定部位，以控制神經性疼痛。

脊髓刺激系統的領域起源應歸功於 Wall 和 Melzack 在 1965 年所發表的極具里程碑意義的論文，在此發表中提出的門控制理論(GCT)的概念，該理論提出「藉選擇性活化大型快速傳導神經纖維來實現對疼痛的控制」。因此，疼痛緩解是藉活化背柱 A β 神經纖維來實現的，從而對感覺和疼痛的閾值產生不同的影響，並對高階皮質處理產生可測量的改變。兩年後首次報導了背柱刺激的臨床應用，此後該領域逐漸擴大。脊髓刺激系統是鴉片(Opioids)類藥物的安全且有效替代品，多項隨機對照研究已證明對難以治療的神經病變(例如背部手術失敗綜合徵)有相當好的療效。



資料來源：<https://www.hopkinsmedicine.org/> (2023)

圖 2.2.7 脊髓刺激器

圖 2.2.7 是脊髓刺激器，也稱為背柱刺激器，是一種植入體內用於治療慢性疼痛的神經調節工具。藉發出阻止疼痛訊號的電刺激訊號，可以阻止大腦感知疼痛。使用此刺激器的目的是控制與脊髓、背部、手臂和腿部相關的疼痛，是用於治療對藥物和其他按摩療法無效的慢性疼痛。

目前，每年估計植入約五萬個脊髓神經刺激器。其原因為神經性疼痛病徵的日益流行，有一定程度上推動了神經刺激技術的增長，特別是背部手術失敗綜合特徵患者的激增，以及嘗試使用慢性 Opioids 類藥物治療以外的其他治療策略來治療慢性神經性疼痛。除背根神經節的刺激外，電極通常放置在背柱的生理中線附近，以電刺激來活化背柱軸突，從而導致動作電位的順向和逆向傳遞，以產生節段和逆向傳遞的脊髓上效應。其中大直徑的神經放電動作電位的閾值較低，因此，比較小的神經纖維會被優先選擇活化。然而，目前仍不清楚哪些特定神經纖維需要活化，那些頻率和振幅是可達到最佳緩解疼痛的因由，以及慢性脊髓神經刺激器的活化模式應如何變化，此領域將提供未來新的研究發現和創新的機會。

根據 Global Market Insights, Inc. 的公開數據，2018 年全球神經刺激裝置市場收入估值為 70 億美元，預計到 2025 年將突破 190 億美元。此外，其報告亦指出 2018 年脊髓神經刺激(SCS)的領域的市場價值約為 35 億美元，到 2025 年將出現強勁增長趨勢，目前應可再進行深入分析以驗證這些公開數據。

經觀察全球趨勢，可以發現幾項重要因素與增長趨勢的預測一致。首先，人們越來越偏愛微創手術技術。這一趨勢應該有利於在不影響功能和可靠性的情況下實現小型化的技術，從而降低接受微創治療的患者的治療成本、減輕疼痛並加快術後恢復時間。隨著創新且經濟高效的神經刺激器的日益普及，微機電製程及系統技術完全躋身技術進步之列，從而加速了神經刺激系統及裝置的整體市場的需求。其次，因神經系統疾病發病率逐年上升，包括美國和全球皆有需要更好的疼痛管理的治療對策，代表了全球已出現強勁的需求趨勢。第三，政府減少 Opioids 類藥物依賴的使用及限制有所增加。例如，美國食品和藥物管理局相當希望能採用替代療法來代替 Opioids 類藥物作為疼痛治療方案，以避免產生成癮案例。因此，要求快速審查及核准可用於替代 Opioids 類藥物的疼痛管理公司已向美國食品和藥物管理局提交了兩百多份申請。為了利用這一潛力，Medtronic、Abbott 和 Boston Scientific 等醫療系統公司皆已積極進行臨床研究並開發下一代新型設備。

在積極的投資與努力之下，Medtronic 是成功推出神經刺激裝置產品的

領先公司之一。於 2017 年 9 月，他們在美國推出了 Intellis™ 平台，用於管理某些類型的慢性且頑固性疼痛。該平台可以記錄和跟踪患者活動，使醫生能夠為每位患者定制刺激方案。他們在生產心臟起搏器和深部腦刺激器的脈衝發生器等類似裝置方面擁有深厚的知識和專業知識。他們的成功策略之一是使用經過充分驗證和美國食品和藥物管理局批准的脈衝發生器、刺激電極和手術方案將該系統引入體內。為了能夠有效地通過美國食品和藥物管理局審查流程，他們在所有產品線中盡可能重複使用設計、材料、製造工藝、包裝和推薦的手術程序。除了 Medtronic 的典範案例之外，神經刺激裝置市場上只有少數幾家公司，包括 Boston Scientific、Abbott、Bayer、IntraPace、Neuronetics、Nevro、ImThera Medical 和 Uroplasty。

儘管事實證明目前在醫療上對替代性疼痛管理的需求不斷增長，但廣泛採用神經刺激裝置產品仍存在現實障礙。最值得注意的是治療費用以及國家內部和國家之間醫療服務分配不均。每次神經刺激裝置產品的植入費用約為兩萬一千美元至五萬八千美元，並還須有額外的年度維護費用。與深部腦刺激器系統類似，神經刺激裝置產品所處的領域的醫療服務仍嚴重不足。所以在此領域應仔細分析不同因素，以確定最佳行動方案，不僅包含技術的進步，還涉及政府政策和社會接受度。

7. 植入式輸液幫浦

植入式輸液泵是以微機電製程技術製造的一種植入體內的微型藥物輸送系統。此系統包括一個可重複填充的儲液槽，其中包含可控制的藥物劑量，通過導管輸送到體內的目標部位。圖 2.2.8 為 Medtronic 的典型範例，此 Medtronic 裝置，是向脊髓輸送藥物以控制慢性疼痛。這種標靶藥物傳遞系統的主要優點是，可實現最佳疼痛管理，且所需的劑量比全身用藥低得多。其操作方式是以藥物通過儲液器填充口進入輸液幫浦，並通過儲液器閥門進入 SynchroMed™ II 泵儲液器。在正常體溫下，儲存在儲層下方的加壓氣體會膨脹，對儲層施加壓力，以將藥物推進到 SynchroMed™ II 的幫浦輸入管中。SynchroMed™ II 輸液幫浦的蠕動驅動機制將藥物從儲液器推動，再通過泵管、止回閥、導管接入端口和植入導管，到達輸注部位。此技術除了在脊髓輸送藥物應用之外，亦可應用在肝動脈輸液幫浦，用於將抗癌藥物輸送到肝臟中，以及應用在 Type I 糖尿病患者的胰島素輸送。



資料來源：www.medtronic.com (2023)

圖 2.2.8 Medtronic SynchroMed™ II 植入式輸液幫浦

圖 2.2.8 所示的是可編程的植入式泵，它以植入的導管將藥物輸送到鞘內空間。SynchroMed™ II 泵可以使用 Control Workflow™ 方法進行管理，可有效的疼痛緩解。

根據 Research and Markets 公佈的公開數據，全球植入式輸液泵市場預計將從 2021 年的 174.2 億美元增長到 2022 年的 182.6 億美元，複合年增長率為 4.8%。植入式輸液幫浦市場的主要參與者都是神經調節領域非常熟悉的公司，包括 Medtronic、Boston Scientific Corporation、Neuro Corporation、Cyberonics、Baxter、B. Braun Melsungen AG、Fresenius Kabi AG、Smiths Medical、Terumo Corporation 和 Neuropace。

綜觀目前須長期使用藥物的慢性病，如慢性疼痛、癌症和糖尿病患者患病率的增加預計將推動對植入式輸液幫浦的需求，因為這些幫浦通常應用在這些疾病的治療過程中進行藥物輸送以及劑量控制。而隨著人口老年化和社會行為的轉變，導致這些疾病的病例數逐年增加，世界各地的慢性疾病和失調正在增加。如慢性蛛網膜炎(脊髓周圍的一層膜腫脹)等疾病中，植入式輸液泵可輸送較低劑量的藥物，提供更有效地疼痛緩解療效。

目前在植入式輸液幫浦市場以開發智能輸液幫浦系統為主。微機電製程技術及系統科技允許將超小型感測器安裝在幫浦內高度受限的空間內。這些感測器對於監測幫浦的運行、儲液器內的藥物液位、流速和壓力至關重要。此外，無線技術的使用，讓系統可通過藍牙或行動通訊網路(cellular connection)將數據從設備傳輸到智能手機或無線設備進行數據處理，並顯示結果，提供可針對患者進行個人化的制量方案的制定對策。

(三) 結論

微機電製程技術及系統在生醫方面的應用及價值已經是不爭的事實，它是目前可以製作出與人體細胞、組織、器官等不同尺度的應用裝置的主要之可大量製造的製程方法，不論是體內或體外的系統，皆可提供可產生相同尺度的生化或物理之生理機制。綜觀本節所提供的典範案例，可以知道微機電製程技術是每一項成功的生醫技術的重要推動基石，只有依賴成熟的微機電製程技術做為後盾，才能快速解決匹配人體各器官複雜的三維結構的裝置需求，以及提供有周詳介面，具操控、感測、輸送功能之可靠、可重複、生物相容性的裝置。目前生醫的發展非常快速，新的需求及治療方法不停地被提出來，而如何製造出可靠的裝置以達成醫療的目的，是全球學界及業界共同的問題，目前剛開始被重視的微生理系統跟穿戴裝置即為最佳例子，若我國的微機電產業能快速地洞悉這些新興的生醫應用，將有機會嶄露頭角，凸顯出國際領先的地位。

而從人工耳蝸、深部腦刺激器、脊髓刺激器 和植入式輸液幫浦的分析，可以分析出幾個共同的現象，這些現象可以作為植入式設備的微機電技術未來發展的指導原則，此發展模式也可做為微機電產業進入持續上升及擴展之生醫產業的典範發展策略。

首先，與消費產品不同，所有這些設備都存在很高的進入門檻，這表示只有少數公司能夠成功推出產品並享受良好的利潤率。其次，雖然取得了成功，但若僅滿足於解決在高度服務需求及高度市場增長中的一小部分人群的需求，這意味著此市場具有快速擴張的潛力。第三，該領域的成功公司都會利用其產品技術、營銷和監管途徑方面深厚的內部專業知識和經驗，盡可能地廣泛的應用在其他具有類似的設計、材料、和需求的領域。第四，管理機構的支持和政府政策往往決定了該領域產品的成敗。

為微機電製程技術及系統在植入式醫療設備的市場中的布局考量，應妥善的且策略性地應用以下兩項既有資源：

1. 利用微機電技術增強現有產品：幾乎所有植入設備都可以受益於微機電技術的小型化、成本效益、精度和生物相容性等特性及優勢。使用微機電製程技術來製造生醫產品可提高讓食藥署批准此產品的機會，這是一種經濟上相對有效的方式，可以拓展到服務不足的市場。
2. 開發基於已有的微機電技術的新產品：例如，微機電技術可以加速下一代「人腦-電腦介面」，它可能使用數千個電極，同時具有記錄和刺激能力，受保護和無縫的無線通信能力，以及擴展成需充電壽命長達 20

年的不需供電的體內植入裝置。美國國衛院目前已投資 45 億美元的大腦計劃，另在全球各領先團隊的積極推動下，神經科學家和神經工程師正爭先恐後地進行人腦-電腦介面的首次人體應用，希望洞悉認知和記憶活動的內部運作，方便利用這些知識來治療或預防多種神經和精神疾病，甚至增強健康個體的認知和記憶功能。NeuraLink 公司就是一個典型的例子，其使命是「創建一個通用的大腦介面，以恢復那些今天醫療需求未得到滿足的人的自主權，並釋放人類明天的潛力。」

三、電動車座艙應用

(一) 微機電技術於汽車座艙應用之概觀

微機電技術(MEMS)在汽車座艙中扮演著很重要的角色，主要是應用在感測器(Sensor)與致動器(Actuator)上，特別是感測器在現代汽車座艙中的應用十分廣泛，大幅提升座艙的智慧化程度，它們用於監測和控制各種車內參數，提供更智能、安全和舒適的駕乘體驗，具有以下幾個重要的優點：

1. 提升安全性：感測器可以監測駕駛者和乘客的狀態，例如檢測座位上是否有乘客、監測駕駛者的注意力和疲勞程度等。這些數據可以用於觸發安全系統，例如安全氣囊、安全帶警報器和防撞系統，以提供更高的安全性和保護。
2. 提供舒適性：感測器可以監測座椅的溫度、濕度和壓力，並根據乘客的需求調節座椅加熱、冷卻、通風和按摩功能。同時，感測器還可以調節車內照明、音頻和空調系統，以提供個性化的舒適體驗。
3. 優化能源效率：感測器可以監測車內和車外的環境條件，例如光線水平、溫度和濕度，並根據實時數據調節空調和照明系統，以節省能源和提高燃油效率。這有助於減少能源浪費，降低碳排放，並提高整體車輛的環境友好性。
4. 提供智慧互聯功能：感測器的數據可以與車輛的互聯網系統整合，以實現智慧功能和服務。例如，感測器可以與導航系統結合，提供即時交通資訊與路線建議；同時，它們還可以與語音助手系統整合，實現語音控制和智慧操作。

總體而言，感測器在汽車座艙中的應用，提供了即時數據和控制，以優化各種車內系統，提高駕乘體驗，並為乘客和駕駛者提供更好的保護和

便利性，使得車輛能夠更加智慧、安全和舒適。

(二) 微機電感測器在汽車座艙中的應用示例

1. 溫度感測器：溫度感測器用於監測座椅、空調和車內環境的溫度。這些感測器可調節座椅加熱或冷卻功能，並控制空調系統以維持乘客舒適的溫度。
2. 環境光感測器：可用於測量車內和車外的光強度，並根據光線強度調節車內照明系統的亮度。這些感測器可以自動調整車內照明，提供適合的照明條件，並在光線暗或亮的情況下調整顯示器的亮度，提高駕駛和乘客的視覺體驗。
3. 濕度感測器：濕度感測器用於測量車內空氣中的濕度。它可以控制空調系統以調節濕度，提供更舒適的車內環境。
4. 光學感測器：可用於監測車內環境，例如監測座位上是否有乘客、檢測座位的佔用情況等。這些感測器使用光學技術來檢測和量測，提供準確的數據用於座椅安全系統和車內監測。
5. 壓力感測器：壓力感測器用於監測座椅和方向盤的壓力分佈，以檢測乘客的位置和姿態。這些感測器可以調節座椅的支撐和調整，提供個性化的座椅舒適性和支持。
6. 影像感測器：可用於監測駕駛者的注意力和疲勞程度，甚至可用於追蹤駕駛者的眼睛運動，以收集眼部運動數據，檢測注意力分散和疲勞，並基於分析結果提供警示或建議，以提醒駕駛者保持警覺。另外，影像感測器也可用於檢測駕駛者的手勢動作，以實現人機交互控制。這些感測器可以監測手部運動，如手指、手掌的位置和動作，並將其轉換為對車輛功能的控制指令，例如調整音量、接聽電話等。
7. 空氣品質監測：可用於監測汽車座艙內的空氣品質，如二氧化碳、揮發性有機化合物和微粒物質。這些感測器通常基於光學或化學原理，能夠提供準確的空氣品質數據，並在必要時啟動空氣淨化系統。
8. 音頻感測器：音頻感測器用於監測車內的聲音水平。它可以自動調節車內音響系統的音量和音質，以達到最佳的音樂播放或通話體驗。
9. 麥克風陣列：用於車內語音控制系統，可以精確地量測駕駛者和乘客的語音指令，以實現手勢無關的控制操作，例如調整音響、導航系統

和通話功能。

上述 2、4、6、7 為 MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems) 技術在汽車座艙中的一些應用案例，上述 8 與 9 為聲學 MEMS (Acoustic MEMS) 在汽車座艙中的應用案例，它們利用微型、電子和機械元件來實現各種功能，提高車輛的性能、舒適性和智慧化。

(三) 微機電感測器於汽車座艙智慧化的實現

現代化的汽車不僅是交通工具，更是人們生活的一部分。為了提升駕駛者和乘客的舒適性、安全性和便利性，越來越多的微機電技術(MEMS)製造的感測器應用於座艙內部，在汽車座艙中扮演關鍵角色，它們能夠監測和控制各種參數，提供個性化的座艙體驗，實現智慧座艙的概念。

如圖 2.3.1 所示，友達在 2023 年展出了以顯示技術為核心，整合多種 MEMS 感測器的未來智慧座艙，結合了最新的科技和設計，這個創新的座艙概念引起了廣泛的關注和興趣。該智慧座艙融合了最新的技術和設計理念，以其先進的人機界面和高安全性的駕乘體驗，提供了前所未有的駕乘體驗，為駕乘者帶來更加智能、舒適和安全的旅程。



資料來源：友達光電 (2023)

圖 2.3.1 友達智慧座艙

此智慧座艙，高度整合友達的核心顯示技術及感測元件，為駕駛與乘客打造舒適安全的沉浸式座艙空間，並運用 miniLED、Micro LED 等前瞻顯示技術，將後座娛樂與商務體驗再升級，打造兼具創新與安全的智慧移動體驗，使車輛座艙成為兼具智慧、娛樂、安全與人性化的第三生活空間。



資料來源：友達光電 (2023)

圖 2.3.2 Touch Taiwan 2023 友達智慧座艙

以下，以此智慧座艙做為案例，說明微機電技術(MEMS)，如何應用在智慧座艙中。

(1) 影像感測器 MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems)技術在智慧座艙中的應用：

影像鏡頭模組在車輛上的應用越來越廣泛，影像感測器是鏡頭模組中最關鍵的部件，影像鏡頭模組可以依照供應鏈或技術分為以下幾類：

- A. CMOS 影像鏡頭模組：這是目前最常用的鏡頭模組之一，其採用的是 CMOS 技術，具有低功耗、高效能和易於整合等優點。
- B. CCD 影像鏡頭模組：相較於 CMOS 影像鏡頭模組，CCD 技術可以提供更高的圖像品質和更低的雜訊水平，但功耗較高。
- C. 熱成像影像鏡頭模組：利用熱成像技術來感測周圍環境的溫度，通常應用於夜視系統，以增強駕駛員對路面狀況的警覺性。
- D. 魚眼影像鏡頭模組：魚眼鏡頭是一種超廣角鏡頭，可以提供 180 度上的視野，通常用於車輛的監視系統，例如倒車輔助和周圍環境監控。

- (2) 影響圖像品質、功耗、性能和應用方面的設計和技術有以下幾點：
- A. 鏡頭設計：鏡頭設計是影響圖像品質的主要因素之一。鏡頭的光學性能、焦距和光圈大小都會直接影響到圖像的清晰度和亮度。因此，在設計鏡頭模組時，需要根據應用需求選擇適當的鏡頭，以保證圖像品質。
 - B. 影像感測器技術：影像感測器是鏡頭模組中最關鍵的部件，其技術程度直接影響到圖像的品質和性能。目前常用的感測器技術包括 CMOS 和 CCD，CMOS 技術在功耗、成本和整合度方面較優，但其圖像品質較 CCD 感測器差。
 - C. 訊號處理技術：訊號處理技術對圖像品質和性能也有著重要的影響。影像訊號的壓縮、增強和降噪等技術都能夠對圖像品質進行改善。同時，訊號處理技術的高效能也能夠降低功耗，提高設備的性能。
 - D. 車輛系統的整合設計：影像鏡頭模組在車輛上應用時，需要考慮到整個車輛系統的整合設計，例如與其他感測器和控制系統的配合，以確保車輛系統的正常運行和性能。

總體而言，影像鏡頭模組的設計和技術因素十分繁多，需要考慮到各種因素的影響，以確保最終產品滿足應用需求，當影像鏡頭整合到顯示器中，可以有更好的整合性，且兼具座艙內裝造型設計上的美觀。

如下圖 2.3.3 所示，此智慧座艙搭載了 A 柱到 A 柱的 55 吋超大型曲面顯示器，該顯示器整合了隱藏式紅外線鏡頭模組，如圖 2.3.4 所示，鏡頭的絕佳位置與角度，可清楚及高正確性地監測駕駛的狀態，在利用影像鏡頭模組擷取到的駕駛影像後，可用以辨識駕駛身分，並在儀表及中央控制顯示屏，顯示個人化的設定，並提供個人化的內容。



資料來源：友達光電 (2023)

圖 2.3.3 Touch Taiwan 2023 A 柱到 A 柱_55 吋超大型曲面顯示器

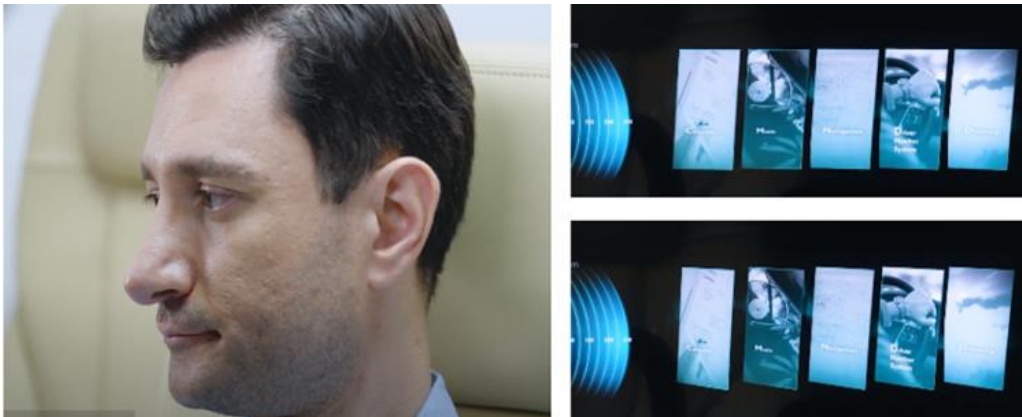


資料來源：友達光電 (2023)

圖 2.3.4 隱藏式鏡頭

(3) 微機電影像感測器與駕駛人的互動：

在辨識駕駛者身分後，可提供個人化資訊，中央控制顯示器將顯示該駕駛常用的功能選單，而功能選單原來為平面 2D 型態，如圖 2.3.5 所示，當駕駛眼睛看向中央控制顯示器，欲選擇功能時，鏡頭模組將偵測到駕駛視線從正視前方看向右前方，依據其視線角度與位置，判斷有控制功能選單的意圖，功能選單將以 3D 旋轉面向駕駛，藉此與駕駛產生互動，表達"我來服務您"。



資料來源：友達光電 (2023)

圖 2.3.5 互動式功能選單

駕駛疲勞偵測系統在汽車中非常重要，因為駕駛疲勞是導致交通事故的主要原因之一。長時間的駕駛、缺乏休息、睡眠不足或身體狀態不佳都可能導致駕駛者出現疲勞，進而影響其反應能力、專注力和判斷力。駕駛疲勞偵測系統的目的是監測駕駛者的狀態並提前檢測疲勞跡象，以提醒駕駛者休息或採取必要的措施，從而減少交通事故的發生。

駕駛疲勞偵測系統通常使用多種感測器和技術來監測駕駛者的狀態，例如：

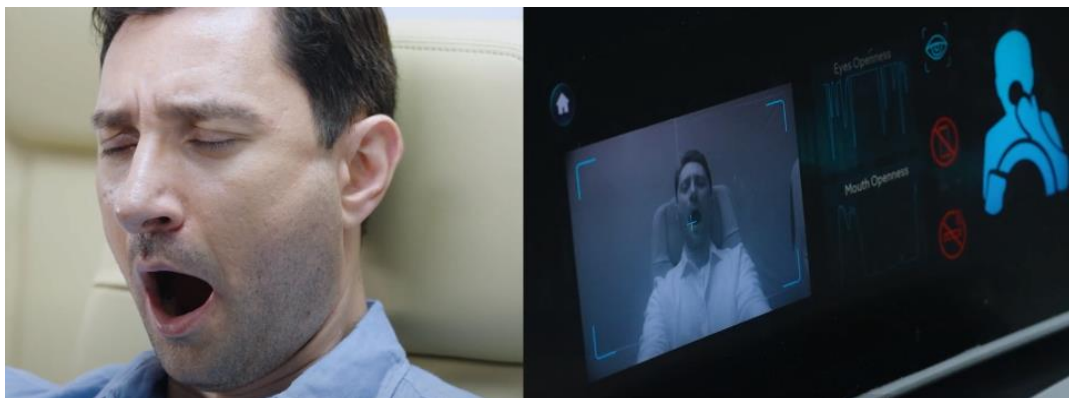
A. 視覺監測：系統使用內置影像鏡頭模組或紅外線影像鏡頭來追蹤駕駛

者的眼睛運動、眨眼頻率和瞳孔大小，以檢測眼睛的疲勞跡象，例如頻繁眨眼、長時間的注視或眼睛閉合。

- B. 方向監測：系統使用方向盤感應器來監測駕駛者對方向盤的操作，檢測是否存在過度或不正常的方向盤動作，這可能表明駕駛者失去對駕駛任務的專注。
- C. 車道偏移監測：系統使用車輛的車道偏移感應器來監測車輛的行駛軌跡，如果駕駛者頻繁偏離車道線或車輛發出警示，可能表明駕駛者失去了對駕駛任務的控制。
- D. 生理監測：一些高級的駕駛疲勞偵測系統還使用生理監測技術，如心率監測、皮膚電阻測量等，以檢測駕駛者的生理狀態，例如心率過快或過慢、手部的微弱電流變化等。

各國家和地區都有相關的法規和標準要求汽車製造商在車輛中搭載駕駛疲勞偵測系統。例如，歐洲在其安全性規範(ECE R13)中要求新型汽車裝配疲勞警示系統。此外，一些國家和地區還有針對駕駛疲勞偵測系統的特定法規要求，包括檢測準確度、警示方法和可靠性等方面。

因此，智慧座艙中的 55 吋超大型曲面顯示器，就整合了隱藏式紅外線鏡頭模組，具備駕駛狀態監視系統(DMS, Drive Monitoring System)，去追蹤駕駛者的眼睛運動、眨眼頻率和瞳孔大小，以檢測駕駛的疲勞跡象，如圖 2.3.6 所示，甚至是駕駛已在打瞌睡的危險狀態，如圖 2.3.7 所示，此時，可透過聲響、椅子振動...等方式喚醒駕駛，提供及時的警告，以確保駕駛者保持警覺，甚至進入輔助自動駕駛模式；同時也可判斷駕駛的姿態，是否正在邊開車邊拿手機講電話，如圖 2.3.8 所示，或是左顧右盼未能專心開車等行為，如圖 2.3.9 所示。



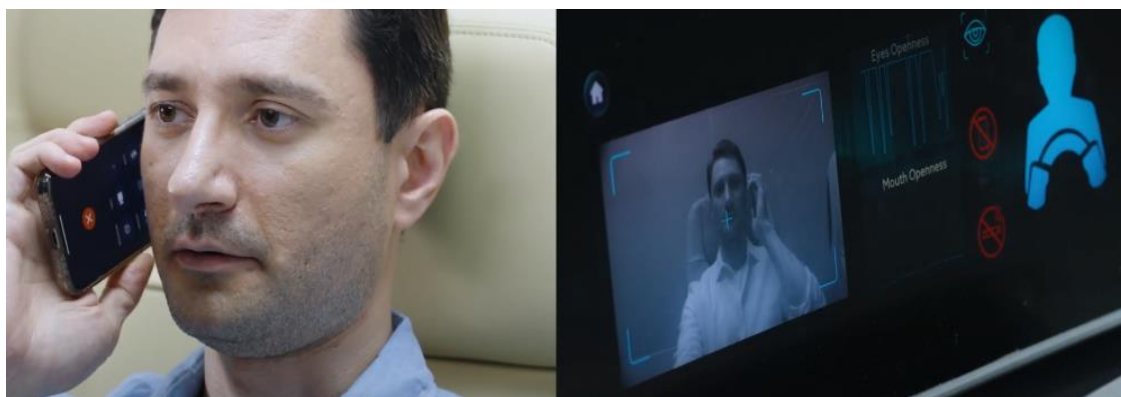
資料來源：友達光電 (2023)

圖 2.3.6 疲勞駕駛狀態



資料來源：友達光電 (2023)

圖 2.3.7 駕駛打瞌睡狀態



資料來源：友達光電 (2023)

圖 2.3.8 分心狀態



資料來源：友達光電 (2023)

圖 2.3.9 左顧右盼狀態

智慧座艙中的 55 吋超大型曲面顯示器，有一部分是副駕駛座乘客專屬的顯示區，在副駕駛座端同樣也整合了隱藏式紅外線鏡頭模組，副駕駛座同樣可以延伸出更多的應用，例如依據乘客身份提供個人化資訊，若乘客是已註冊的親人或好友，就可以透過影像鏡頭模組取得乘客影像，進行

身份辨識，顯示經常使用的個人化介面、喜愛的影音節目、常用的功能選項，若是沒有註冊的朋友，就顯示一般資訊。除了識別身份提供個人化的應用之外，當乘客閉眼休息或副駕駛座沒有乘客時，如圖 2.3.10 所示，副駕顯示區也會主動關閉，如圖 2.3.11 所示，讓電力更節省，因為在電動車時，節能省電極為重要，不須駕駛費心去關閉副駕顯示區的電源。



資料來源：友達光電 (2023)

圖 2.3.10 乘客閉眼休息或副駕駛座無乘客



資料來源：友達光電 (2023)

圖 2.3.11 副駕顯示區關閉

此外，因副駕駛座有螢幕，可供乘客有更好的乘車體驗與享受，但根據美國國家公路交通安全管理局(NHTSA, National Highway Traffic Safety Administration)的建議和指導方針，副駕駛座的螢幕或其他顯示裝置不應該分散或妨礙駕駛者的注意力。在此智慧座艙中，配置了 55 吋超大型曲面顯示器，呈現大器美觀的畫面顯示，但卻又不能於車輛行進中，乘客利用副駕顯示區觀賞影音娛樂內容時，使駕駛分心而影響行車安全，為解決此問題，特別在副駕顯示區配置主動式防窺技術，可自由切換一般模式與防窺模式，如圖 2.3.12 所示，當駕駛正視前方時，副駕顯示區為一般模式，呈現 55 吋超大型曲面顯示器的完整畫面，當駕駛受副駕顯示區的內容影響而看向副駕顯示區，如圖 2.3.13 所示，此時影像鏡頭模組偵測到駕駛的視線改變，依據駕駛的視線與角度，若駕駛是看向副駕顯示區，則副駕顯示

區將從一般模式自動切換至防窺模式，迫使駕駛再正視前方，此刻，依據駕駛看向前方的視線與角度，副駕顯示區將再從防窺模式自動切換為一般模式，以確保行車安全。



資料來源：友達光電 (2023)

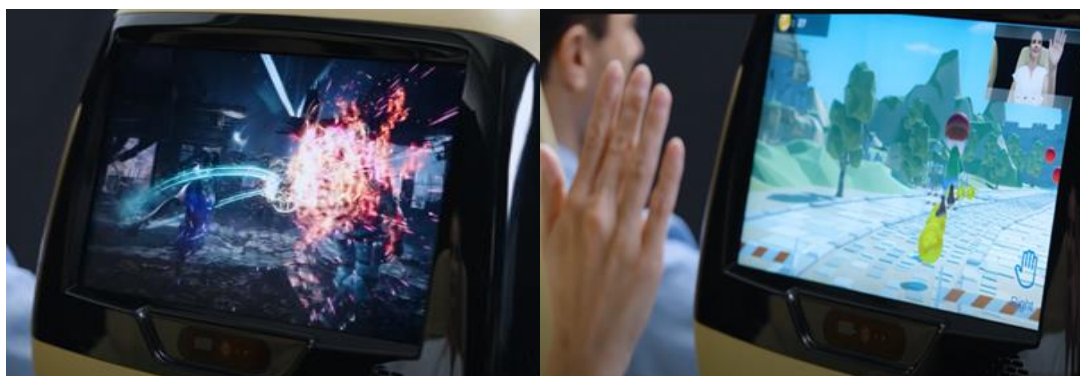
圖 2.3.12 駕駛正視前方，副駕顯示區為一般模式



資料來源：友達光電 (2023)

圖 2.3.13 駕駛看向副駕顯示區，副駕顯示區為防窺模式

不僅如此，影像感測器還可用於人機界面的改進。例如，手勢識別技術可以使用影像感測器來追蹤駕駛者的手部動作，使其能夠藉手勢來控制車輛的特定功能，如調整音量、接聽電話或切換音樂。在此智慧座艙上，在座椅頭枕配置了高刷新率電競等級的 17 吋螢幕，可以在這電競級螢幕上，玩高影像品質的電競遊戲，如圖 2.3.14 所示；在這後座螢幕下方也配置了影像感測器，能夠利用手勢來玩遊戲，做為遊戲角色的方向、跑跳、與射擊控制；這類高級車種的後座乘客，也能在此隨時與客戶、合作夥伴進行會議。有了這樣的組合，就能成為獨立的影音空間，無論是要進行影音娛樂、互動遊戲或是視訊會議，都可以在旅途中得到娛樂與工作兼具的滿足。



資料來源：友達光電 (2023)

圖 2.3.14 具影像感測之後座螢幕

影像感測器也可用於檢測乘客的身體姿勢和位置，以自動調整座椅設置，提供最佳的支撐和舒適性。感測器可以識別乘客的身體輪廓和關節位置，根據其體型和個人喜好調整座椅的高度、傾斜度和支撐位置。

對外的影像感測器還可以用於行車輔助系統，例如車道保持系統和自動緊急煞車系統。感測器可用於檢測前方道路上的障礙物、行人或車輛，並提供及時的警告或自動操作，以確保行車安全。

智慧座艙中的 55 吋超大型曲面顯示器，在駕駛及乘客兩邊各自加入了環境光偵測器，可用於測量車內和車外的光強度，並根據光線強度調節車內照明系統的亮度。這些感測器可以自動調整車內照明，提供適合的照明條件，並在光線暗或亮的情況下調整顯示器的亮度，提高駕駛和乘客的視覺體驗。另外，有一個更智慧的設計，通常在行車時，陽光位置會隨駕駛方向改變，如果只用一個環境光感應器，如圖 2.3.15 所示，全區顯示器只能控制在同一個亮度，很容易就造成一邊覺得太暗、另一邊又感到太亮的狀況發生。有了各自的環境光偵測器，就可以獨立進行調整，針對光線較強的地方進行螢幕的部份增亮，如圖 2.3.16 所示，柔和地調整兩側亮度，銜接上沒有亮度上的明顯差異，讓兩邊都有合適的亮度可以清楚又舒服地觀看。



圖 2.3.15 一般亮度狀態



資料來源：友達光電 (2023)

圖 2.3.16 智慧調光增亮

(四) 微機電聲學音響感測器 (Acoustic MEMS)

聲學感測器也是智慧座艙中重要的元件之一。這些感測器可以監測環境噪音水平，並自動調整座艙內的音樂、音量及語音指示，以提供更好的聽覺體驗。此外，它們還可以偵測乘客的語音指令，並與智能助理系統進行互動，提供即時的乘客服務和資訊。

通常在座艙中，利用喇叭位置的不同，營造出聲音的方向與立體聲場，杜比音效即是常見的技術，但聲音的遠近，通常是透過聲音的大小來營造，但此座艙採用先進的技術，利用 16 顆揚聲器所組成的陣列，放置於椅背中，並透過特殊的訊號處理，能讓乘客感受到立體聲場，縱然聲音大，卻也能感受到是在遠方的聲音，再搭配上遊戲，有身歷其境的深切感受，如圖 2.3.17 所示。



資料來源：友達光電 (2023)

圖 2.3.17 陣列揚聲器在遊戲上的立體聲場應用

智慧座艙中的 55 吋超大型曲面顯示器，在駕駛及乘客兩邊各加入了 MEMS 麥克風，有顯示器的地方就可內建 MEMS 麥克風，藉由在座艙中的位置不同，可藉此識別發音的位置與方向，用於車內語音控制系統之精確感測駕駛者和乘客的語音指令，以執行命令，例如右側前方的乘客說：請開窗戶，則系統將自動打開右側前方的乘客旁的窗戶，達到智慧的人性化控制，實現與手勢無關的控制操作，例如調整音響、導航系統和通話功能。

(五) 其他 – 關於微形發光二極體 (MicroLED)

MicroLED 顯示器亦屬於微機電技術的一個重要應用領域之一。MicroLED 顯示器利用微機電技術的製造方法，將數以百萬計的微小 LED 元素整合在單個晶片上。每個 MicroLED 元素都是一個獨立的發光二極體，

能夠自主發光。藉控制這些微小的 LED 元素，MicroLED 顯示器可以產生高分辨率、高亮度和高對比度的圖像。

MicroLED 顯示器相較於傳統的 LCD 和 OLED 顯示器具有許多優勢，包括更高的亮度、更寬的色域、更快的反應速度和更低的能耗，最特別的是具備透明及可撓的特性，這是現在顯示器做不到的。微機電技術的應用使得 MicroLED 顯示器能夠實現微米級尺寸的 LED 元素和微細的像素間距，從而提供更高的像素密度和更精細的圖像品質，透明與可撓的特性，也為顯示器帶來在移動載具產業中前所未有的應用。

透明顯示器其實可用多種技術達成，最常見如 OLED 與 MicroLED，但對於需要高亮度且需承受高熱低溫嚴苛環境條件的擋風玻璃顯示來說，MicroLED 更為合適。友達率先使用 MicroLED 技術的透明顯示器融入擋風玻璃中，展示 MicroLED 透明顯示器於擋風玻璃的應用，如圖 2.3.18 所示，此處在擋風玻璃上呈現透明儀錶的應用，當未顯示時，顯示區仍為透明的擋風玻璃，當透明儀錶開啟時，即可顯示重要的行車資訊，駕駛同時可看到前方路況，如圖 2.3.19 所示，減少駕駛低頭確認儀表資訊，大幅提升行車安全。

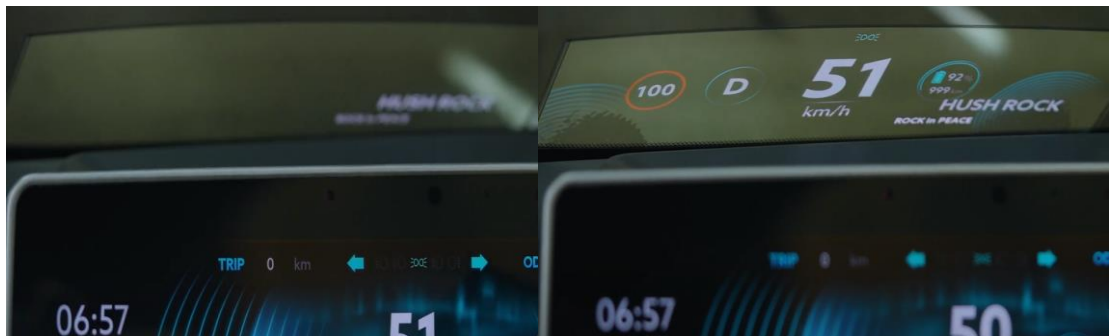


圖 2.3.18 透明儀錶 未顯示 / 顯示



資料來源：友達光電 (2023)

圖 2.3.19 透明儀錶 顯示

在後座擺放螢幕讓乘客可以享有獨立的娛樂資訊系統也越來越常見，但螢幕再怎麼與椅背或頭枕結合，顯示器的表面材質總難以與車內裝飾融合為一體，因為顯示器是黑色的，在車上有一塊一塊的黑色區域，對內裝設計也極為挑戰，不過，這次在這智慧座艙中找到了新解法。

利用 MicroLED 的透明特性，在駕駛座後方有著 13.5 吋的隱形式後座顯示器，如圖 2.3.20 所示，在顯示器還沒點亮時並不會特別注意到，顏色與皮椅顏色相當接近，當開啟顯示器後才赫然發現原來有個顯示器就放在頭枕上，如圖 2.3.21 所示。另外，MicroLED 具有高亮度的特性，若是再利用特殊高穿透率光學薄膜，可使用與車內裝飾同樣調性與質感的紋路，如皮革或是木紋，如此一來後座的顯示器與內飾就更可融為一體，增加質感。當 MicroLED 顯示器點亮時，高亮的畫面穿透薄膜而出，完全不會感覺到光學薄膜的存在，可清楚呈現影像內容。



圖 2.3.20 MicroLED 隱形式後座螢幕 / TFT LCD 電競級後座螢幕



資料來源：友達光電 (2023)

圖 2.3.21 隱形式後座螢幕 未顯示 / 顯示

隨著科技的不斷發展，微機電技術製造的感測器在汽車座艙中的應用將持續演進。未來的汽車座艙可能還將引入更多感測器，如檢測駕駛及乘客的生理健康監測、和情感狀態，以提供更加智慧化和人性化的座艙體驗。同時，感測器的整合和數據分析能力也將不斷提高，以更好地支持智慧座艙系統的決策和自動化控制，以實現更高效、更安全、更舒適的駕乘體驗。

四、微機電射頻(RF-MEMS)應用

(一) 微機電射頻應用於高頻、寬頻與安全的無線通訊

根據市場調查網站 Statista (<https://www.statista.com>) 的統計，至 2022 年為止，全球智慧型手機銷量高達了 13.9 億支，是一個非常可觀的數字與市場規模，代表這些具有行動上網功能的智慧型手機已經是非常普遍的消費性電子產品。對於這類行動裝置內的無線通訊系統來說，微機電技術在此扮演著不可或缺的角色，用來製造射頻(RF, Radio Frequency)元件，而這類利用微機電技術所製造的 RF 元件即被稱作 RF-MEMS。事實上，行動裝置之間的通訊皆是仰賴各種具有特定功能 RF-MEMS 元件的幫助，才能進行訊號的收發與處理，包括天線(Antenna)、可調式濾波器(Tunable filter)、功率放大器(Power amplifier)與開關(Switch)等。有了這些元件作為基礎，才有了現今非常普及的 4G 與 5G 網路系統。4G 已是目前非常成熟的通訊技術，且相關 RF-MEMS 元件的技術與產品已相當成熟；5G 網路於 2019 年才開始正式商用化，並且針對不同的頻段，還可細分為 5G sub-6 GHz 與 5G mmWave 等不同頻段(整體而言，5G 的頻段落在 1-10 GHz 之間)。在經歷了 COVID-19 後，人們意識到數據傳輸的速度與便利性日益重要，無線通訊的終端市場需求(個人電腦、智慧型手機)也日漸增加。其中最主要的原因來自於在各個國家在封城期間，人與人之間仍然需要透過通話或是視訊的方式彼此聯繫，助長了消費性電子產品的銷售額，間接帶動了 RF-MEMS 的成長。截至 2020 年 6 月，北美已有將近 500 萬個 5G 網路使用人數，東亞主要國家(中、日、南韓)更是相當早期就開始使用 5G 網路，至今已有多於 7500 萬個使用需求。另一方面，蘋果公司於 2023 年 6 月 6 號開發者大會(WWDC)上首次展現了多達 12 個 LiDAR 與紅外線感測器的 AR 眼鏡 VisionPro，代表了 AR/VR 產品的演進與成熟。該技術展示了數位世界與物理世界共存的可能性，對於無線通訊系統市場而言，這意味著需要更高速且更具資訊安全與隱私網路的必要性，此即為第六代行動通訊系統(6G, 6th generation mobile networks)。因此，在這樣龐大的數據傳輸需求之下，網路通訊就必需變得更高頻(約 100 GHz 至 1 THz)、更寬頻且更快速，其 RF-MEMS 元件的技術也必需日益革新。相關的實際應用包括娛樂產業中的直播、AR 與全環繞式觀影等，如圖 2.4.1 所示。

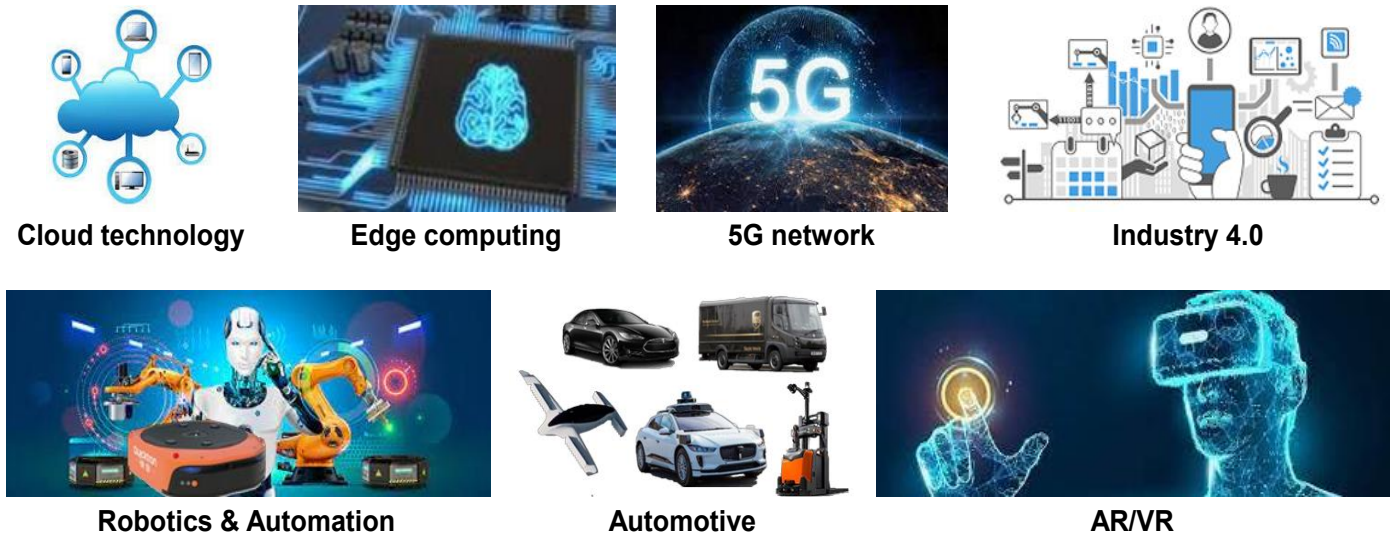
除了消費市場的終端通訊應用之外，事實上在雲端運算、工業 4.0、AR/VR 與車用自動化等領域，如圖 2.4.2 所示，也是需要相當巨量的運算資源、快速的資料傳輸速率以及安全且寬頻的資訊傳遞通道，進一步提高

了 RF-MEMS 元件的需求與成長。RF-MEMS 前端元件在透過天線進行濾波以及放大訊號時，其效能直接地影響到了裝置的能耗，也因此 RF-MEMS 元件的設計將變得更加複雜，參與的設計公司也越來越多。其市場規模將由 2021 年的 29.9 億美元，以年複合成長率 6% 的速度，在 2027 年將達到 42.9 億美元，如圖 2.4.3 所示。



資料來源: 5G Commercialization and Trials in Korea (2023)

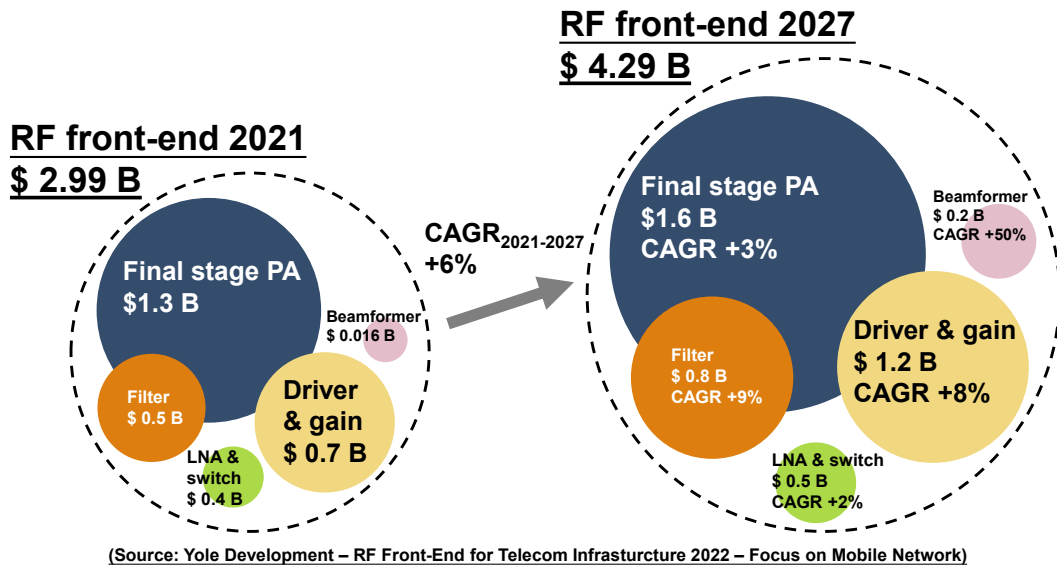
圖 2.4.1 5G 與更高速網路的應用場景，包括 (a) 觀看直播 (b) AR 遊戲與 (c) 全環繞影片觀看體驗



(Source: Yole Development – Status of the MEMS Industry 2021)

資料來源: Yole (2022)

圖 2.4.2 RF-MEMS 在雲端運算、機器人與自動化、5G 技術與 AR/VR 等領域中皆是關鍵的技術之一



資料來源: Yole (2022)

圖 2.4.3 RF 前端元件的市場複合年成長率

(二) 微機電射頻商用晶片的應用典範

如前一章節所述，RF-MEMS 隨著終端裝置對於資料傳輸的頻率不斷提高、頻寬需求不斷增加以及需要同時處理多種通訊標準的情況而蓬勃發展，其優勢包括低成本、面積小、傳輸損耗低以及相當好的訊號隔離度與線性度。RF-MEMS 針對不同的應用場域，對應到不同的元件種類，例如 RF 諧振器用於訊號濾波、RF 振盪器提供低雜訊的時脈參考，及 RF 開關用於切換不同的傳輸頻率等。

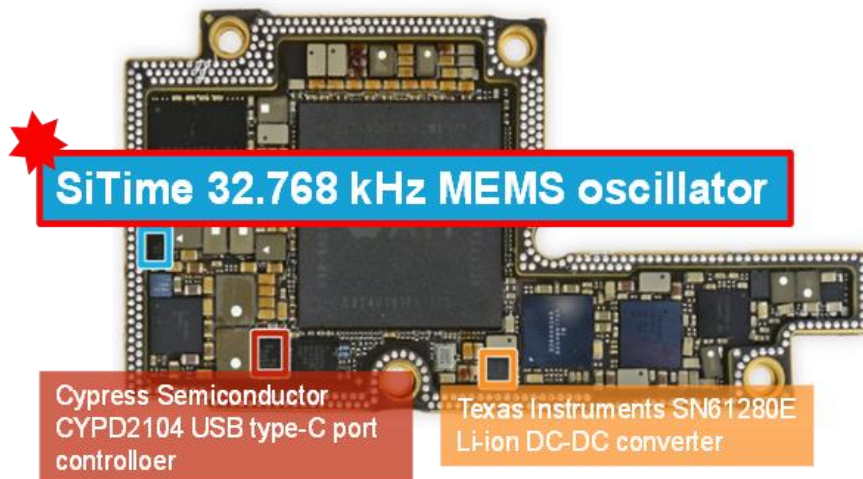
1. RF-MEMS 振盪器的應用典範

振盪器對於積體電路(IC, Integrated circuit)晶片來說，就像是心跳一般，他產生的時脈(Clock)使得電子產品中不同元件之間的訊號能夠彼此溝通，因此 RF-MEMS 振盪器為最基礎也最關鍵的元件之一。RF-MEMS 振盪器具有體積小、功耗低、耐用度高且對於外界環境干擾(如溫度變化、衝擊與振動等)的抵抗性很好等優勢。針對這方面的應用，SiTime 是 MEMS 時脈參考元件市場的領先公司，除了市場份額超過 85 %之外，該公司生產的 SiT15xx 系列的 32.768 kHz 振盪器更是被應用在了 Apple iPhone 當中，如圖 2.4.4 所示，另外還有 Garmin、Xiaomi、Microsoft 與 AMD 等公司也採用了 SiTime 的時脈產品，並用於智慧手錶、平板電腦，智慧居家與繪圖運算當中。該產品具有下列幾項優勢：

(1) 該時脈元件僅 0.55 mm 厚，相當適合放進智慧型手機中。

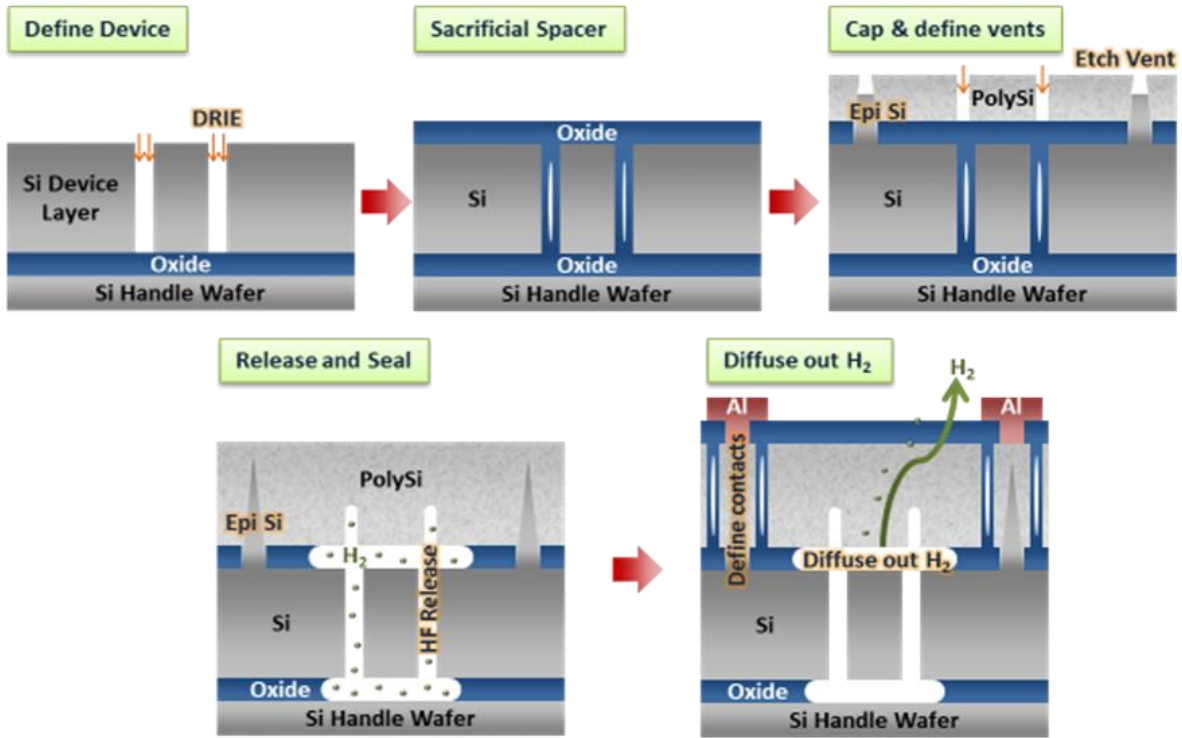
- (2) 元件運作時僅需 0.75 μ A 的供電電流，代表具有超低功耗。
- (3) 具有相當好的頻率穩定度，該元件在室溫下的頻率變化僅 ± 20 ppm，而在 -40°C 至 85°C 的溫度範圍內，頻率變化仍可小於 ± 100 ppm，代表其計時功能相當精準。
- (4) 具有可運作平均 5 億小時而不發生故障的高可靠性。

這些優勢一步分歸功於 SiTime 用來製造 SiT15xx 系列振盪器的 MEMS First 與 EpiSeal 技術，如圖 2.4.5 所示，是 SiTime 成功的關鍵技術。特別值得一提的是，SiTime 並沒有屬於自己的製造工廠，因此其元件生產全仰賴全世界最大 MEMS 代工公司 Bosch。SiTime 正透過其 32.768 kHz 的 MEMS 振盪器取代傳統的石英振盪器(Quartz oscillator)。



資料來源: iPhone X Teardown – iFixit (2023)

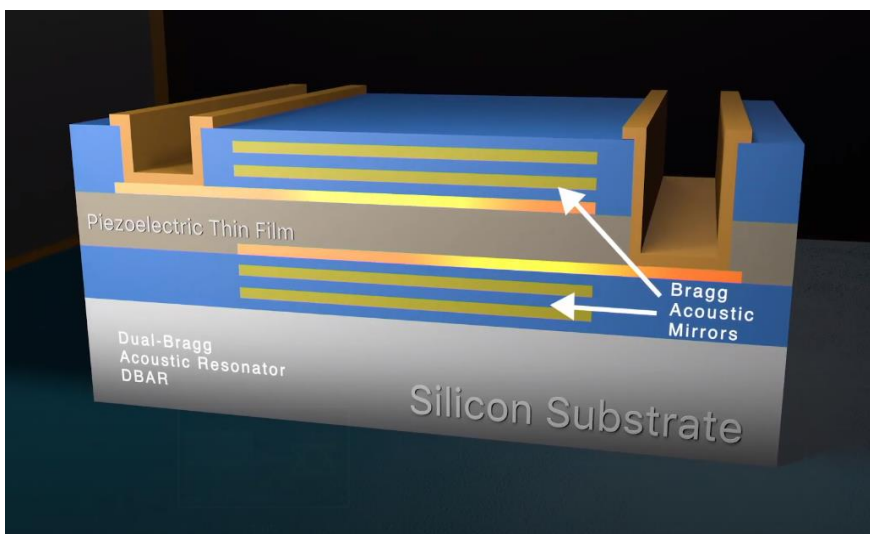
圖 2.4.4 用於 iPhone X 的 SiTime 15xx 系列 32.768 kHz MEMS 振盪器



資料來源: Epi-Seal MEMS Process – Stanford (2023)

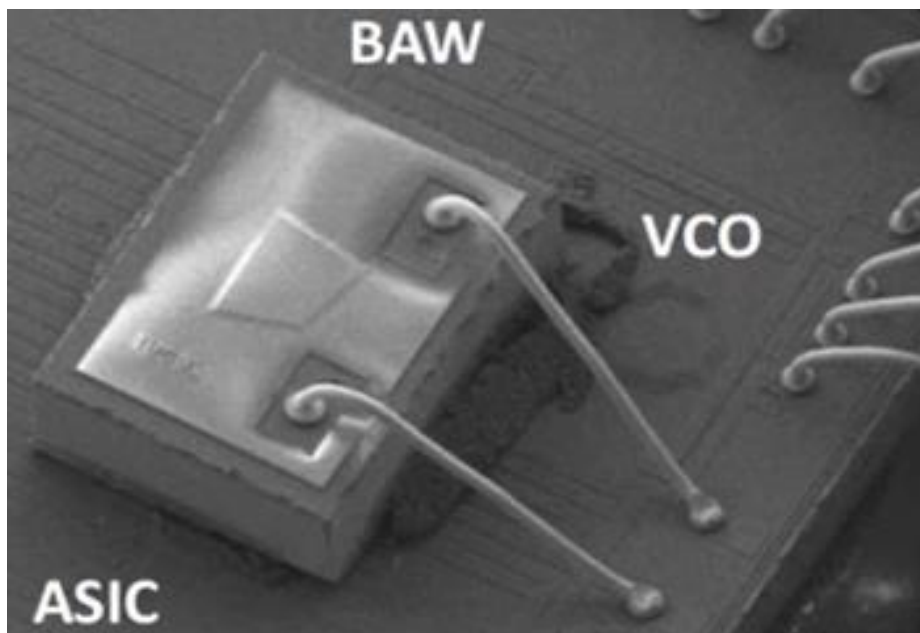
圖 2.4.5 EpiSeal 製程步驟

除了 SiTime 的 32.768 kHz 振盪器相當成功之外，事實上，RF-MEMS 振盪器的操作頻率從低頻到高频皆有，涵蓋了 32.768 KHz 至數個 GHz 的範圍，不同的廠商亦針對不同頻段與應用的振盪器致力於研究與開發。如 2021 年，Stathera 開發了同時能夠輸出 KHz 與 MHz 時脈訊號的單一 MEMS 振盪器，進一步凸顯了石英振盪器只能輸出單一頻率的缺點。而為了符合未來 5G 通訊的需求，RF-MEMS 振盪器對於高频及寬頻的需求正逐漸增加。



資料來源: TI's Bulk Acoustic Wave Cloning Technology (2023)

圖 2.4.6 TI 的 BAW 架構



資料來源：Texas Instruments (2023)

圖 2.4.7 BAW 振盪器與 VCO 與 ASIC 電路接合俯視圖

在高頻振盪器的商用開發方面，德州儀器(TI，Texas Instruments)於 2019 年利用體聲波(BAW，Bulk Acoustic Wave)的技術開發了其首款商用 BAW 振盪器，並在 12 KHz 至 20 MHz 的積分頻率區間中實現方均根值低於 150 fs 的超低訊號抖動(Jitter)。其架構與實際元件照片如圖 2.4.6 與圖 2.4.7 所示。表 2.4.1 比較了 TI BAW 振盪器與傳統石英振盪器的性能。

表 2.4.1 BAW 振盪器相較於石英振盪器之比較與優勢

	BAW	Crystal
First used in oscillator products	2019	1920s
Frequency	1-5GHz	16-96MHz
Quality Factor	>1000	>30,000
Startup energy	<1nJ	~10-100nJ
Size	0.5x0.5mm ²	1.2x1.0mm ² -3.2x2.5mm ²
Frequency variation -40°C – 85°C With only passive compensation	<±150ppm	<±25ppm
Frequency variation -40°C – 85°C With active temperature compensation	<±10ppm	<±5ppm
Frequency drift (aging), 10 years at 25°C	<10ppm	<10ppm
Shift from MIL-STD-883H Shock	<2ppm	<8ppm
In package integration	Yes	No

資料來源：Texas Instruments (2023)

RF-MEMS 的技術，事實上已從 1990 年代由 Hewlett Packard (HP)開始發展，後由 Avago 與 Broadcom 相繼併購。在 MEMS 技術用於 RF 應用之製作開發方面，現階段已有相當多的公司負責上、中及下游的產品線，更有從研發到製造皆獨立的垂直整合公司，形成一個環境友善的生態系統

(Ecosystem)。致力於 RF-MEMS 開發之廠商包括 SiTime、Broadcom、Qorvo、Qualcomm、Texas Instruments 與 Menlo Micro 等，而各廠家的產品皆有所差異。新興的公司包括 Akoustis、Resonant 等也皆有關鍵技術如 XBAW™、XBAR® 的商用化革新，以及相應的主力產品。

2. RF-MEMS 濾波器應用典範

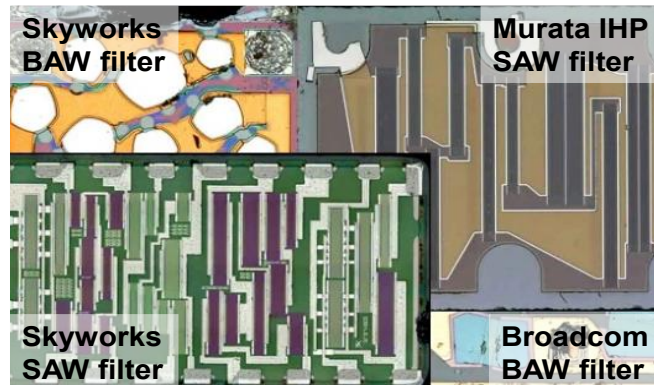
濾波器同樣是無線通訊系統中的必要角色之一，有了濾波器之後，才能夠讓 5G 頻段與 Wi-Fi 頻譜並存而不互相干擾，除此之外在 5G 的通訊頻段中也才可以容納更多頻帶數，並支援更高頻寬應用。濾波器的選用也是手機設計的重要考量因素之一，而濾波器的種類亦針對不同的頻段而有相應的元件。其中包括表面聲波(SAW, Surface acoustic wave)諧振器(Resonator)與 BAW 諧振器。事實上，BAW 諧振器的商業發展已久，最早可追溯到 Avago 於 2001 年為了手機市場所開發的 1900 MHz 雙向器(Duplexer)，而後德國公司 Infineon 亦發表了其薄膜體聲波諧振器(FBAR, Thin-film bulk acoustic wave resonator)的技術，接著 Intel、TriQuint、Philips 等公司亦加入了 FBAR 諧振器的開發，開啟了聲波諧振器的濫觴。這些 RF-MEMS 諧振器可進一步應用在無線通訊中的濾波器。在 RF-MEMS 濾波器方面，目前市面上主力的廠商為 Murata、Skyworks 與 Broadcom，另外還有 Qorvo 與 Qualcomm，這五間公司合計擁有 RF-MEMS 濾波器業務的 80% 市佔。作為 RF 前端模組產業的一部份，SAW 與 BAW 濾波器發揮著關鍵作用，其中有兩個主要的參數是用來衡量 SAW 與 BAW 濾波器好壞的依據，分別為：

元件的溫度係數(Temperature coefficient): 中心頻率(Center frequency)對外在環境溫度變化的偏移量。

耦合係數(Coupling coefficient, k^2): 產生聲波的效率如何？ k^2 越大代表聲波越強，代表其聲波傳遞的延遲損耗(Delay loss)越小。

依照 RF-MEMS 濾波器頻段不同，目前主流的濾波技術為 sub-1 GHz 的 SAW 與數個 GHz 的 BAW。以 Apple iPhone 12 Pro Max 為例，就具有 Skyworks 與 Murata 提供的 SAW 濾波器以及 Skyworks 與 Broadcom 提供的 BAW 濾波器，如圖 2.4.8 所示。事實上，隨著 5G 和 Wi-Fi 6 的興起，SAW 已無法滿足更高頻段的濾波需求，因此幾乎所有的市場主導業者都在尋求 BAW 解決方案。

RF front-end module in Apple iPhone 12 Pro Max

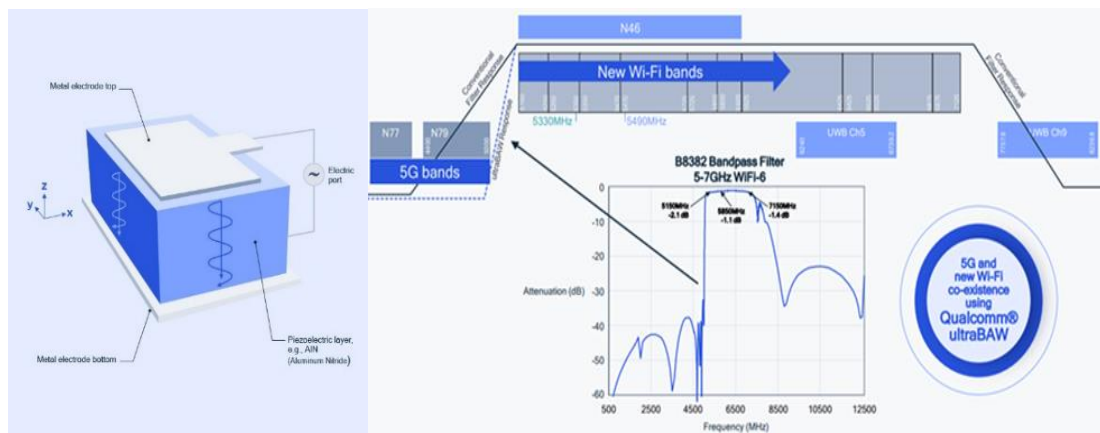


(Source: RF Front-End Module Comparison 2021 – Vol. 1 – Focus on Apple, System Plus Consulting)

資料來源: System Plus Consulting (2021)

圖 2.4.8 iPhone 12 Pro Max 中的 RF-MEMS 濾波器拆解

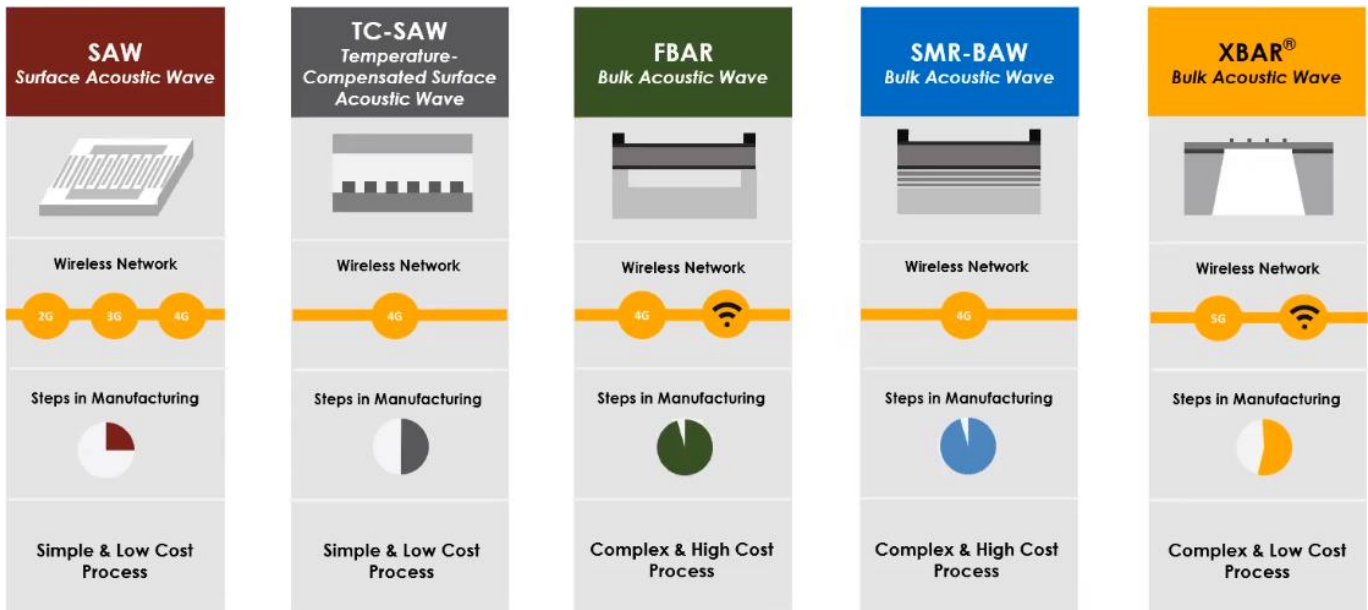
另一方面，Qualcomm 在濾波器的市場緊追而上，該公司在 2016 年與 TDK 合資成立了 RF360 Holdings，並在 2018 年全面接管 TDK 的股份，成為 Qualcomm 的全資子公司。Qualcomm 基於此於 2020 年公佈其開發的 ultraSAW[®] 技術，可應用頻率範圍從 600 MHz 高至 2.7 GHz，並具有大於 5000 的品質因子(Quality factor)與低於 1 dB 的插入損耗(Insertion loss)，使其在當時能與其他已經採用 BAW 技術的濾波器在 sub-2.7 GHz 的頻段中相抗衡。緊接著於 2021 年，Qualcomm 進一步提出基於薄膜壓電材料 AlN 的 ultraBAW[®] 技術，使得 BAW 濾波器成為該公司的主力產品，中心頻率範圍從 2.7 GHz 至 7 GHz，並且在 7 GHz 時具有寬達 2 GHz 的頻寬，使其具備被應用在 Wi-Fi 6E 服務與 6 GHz 頻段的能力以提供更高的傳輸速率，如圖 2.4.9 所示。



資料來源: Groundbreaking Qualcomm ultraBAW filter technology pushes high performance in high 5G frequencies (2023)

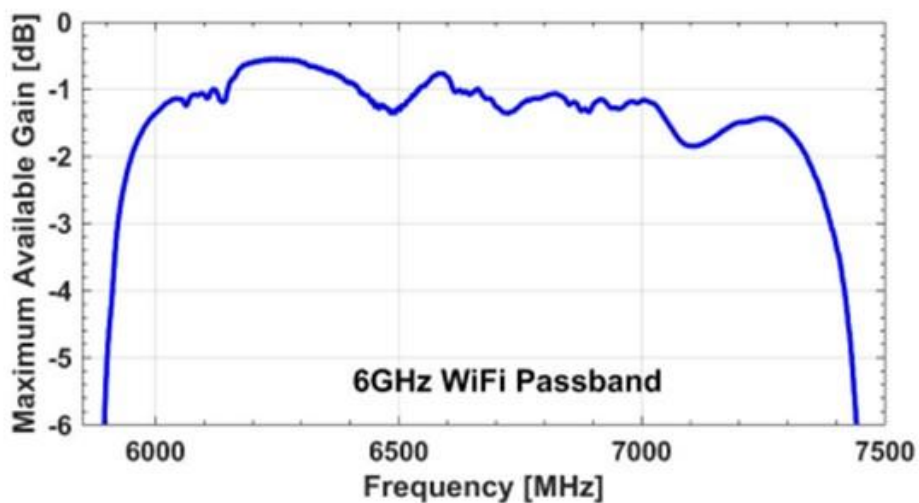
圖 2.4.9 Qualcomm ultraBAW[®] 技術的元件及濾波效果

而在新穎濾波技術開發方面，Resonant(現已被 Murata 收購)的 XBAR[®] 技術亦使用了 BAW 的原理，並能適用於 5G 與高速 Wi-Fi 的通訊，如圖 2.4.10 所示。該公司於 2021 年的 International Ultrasonics Symposium (IUS) 國際研討會中首次提出了這項技術，該技術所使用的諧振器具有高達 28% 的耦合係數 k^2 ，並展現了 1.2 GHz 的頻寬與小於 2 dB 的插入損耗，如圖 2.4.11 所示。而在今年，Akoustis 發表了 XBAW[™] 的 RF 濾波技術，該技術在中心頻率為 5.25 GHz 時可顯示最小 0.86 dB 與平均 1 dB 的插入損耗，並且擁有 205 MHz 的頻寬與高達 50 dB 的頻帶外訊號抑制效果，如圖 2.4.12 所示。



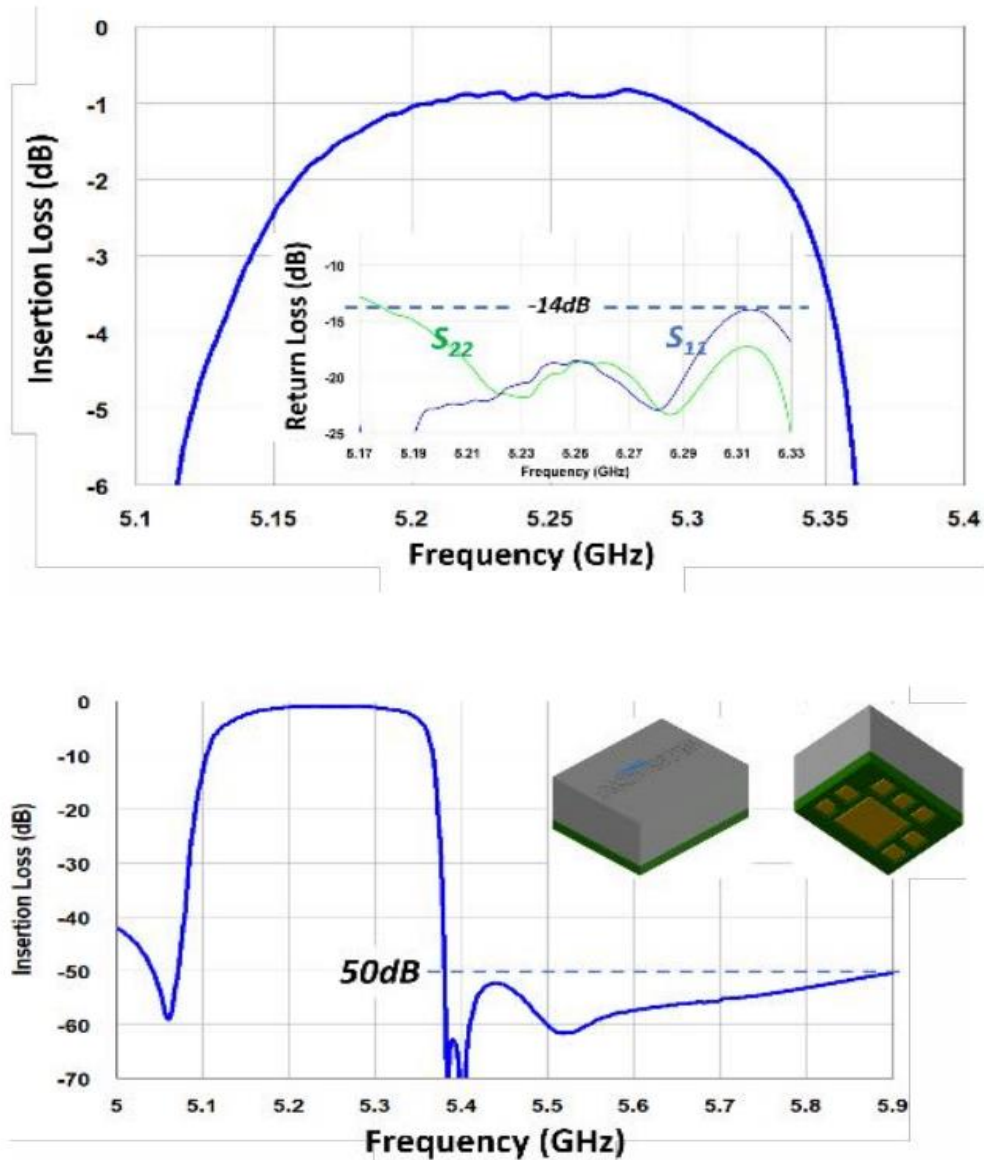
資料來源: <https://www.resonant.com> (2023)

圖 2.4.10 XBAR[®]技術適用於 5G 及高速 Wi-Fi 通訊



資料來源: XBAR (2023)

圖 2.4.11 XBAR[®]技術顯現其在 6GHz Wi-Fi 頻段的濾波效果



資料來源: Akoustis (2023)

圖 2.4.12 Akoustis 的 XBAWTM 技術具有相當好的濾波表現

3. RF-MEMS 開關的應用典範

在 RF-MEMS 開關方面，目前傳統 RF-MEMS 大廠並沒有太多的涉足，然而仍然有一些新創 MEMS 公司針對 RF-MEMS 開關進行研發並獲得投資。其中最具潛力的是 Menlo Micro 與其 Ideal Switch 技術，他們在 2022 年 3 月時宣布他們完成 1.5 億美元的 C 輪融資，使 Menlo Micro 的累計融資總額超過 2.25 億美元。於同一年，Menlo Micro 年提出 MM5120 RF Switch，其頻率操作範圍為可從 DC 高至 18 GHz，且提供了高至 25 W 的功率處理

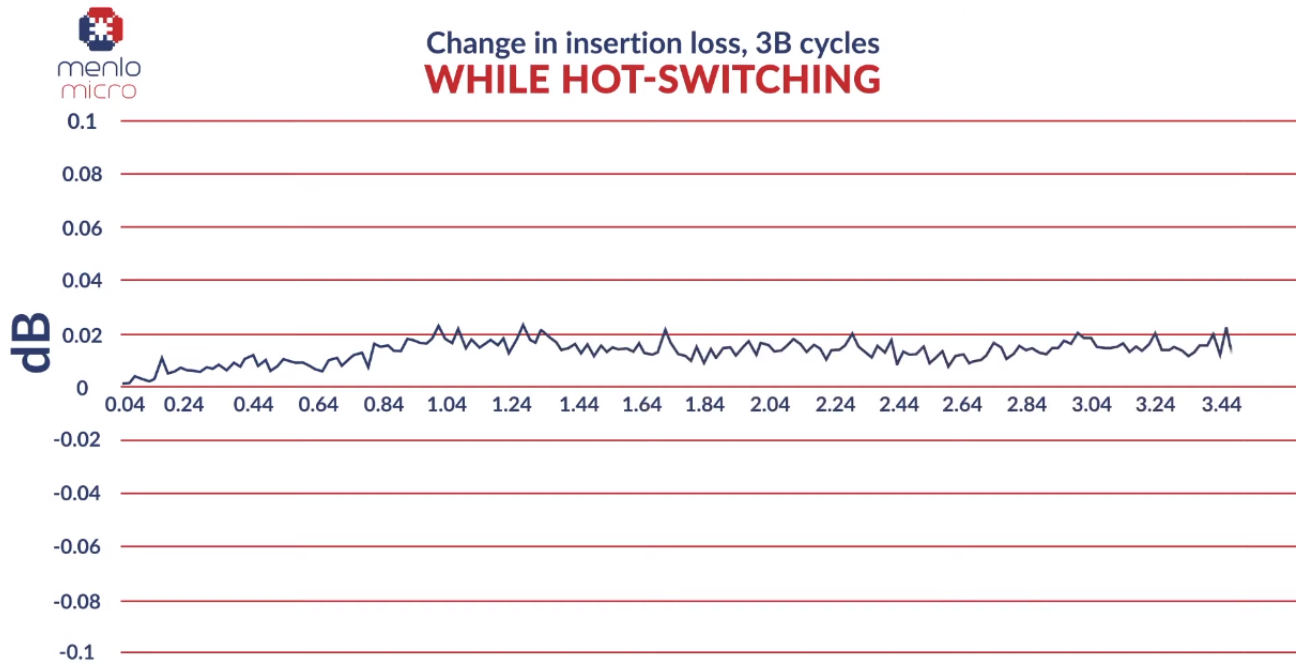
(Power handling)能力。該開關為商用 RF Switch 具指標性的產品，如圖 2.4.13 所示，包括了以下數項優勢：

可靠度：超過 30 億次的操作次數，相較於傳統電磁式繼電器及固態 (Solid-state) 開關，具有 1000 倍以上的使用壽命，意味著到 2050 年時，更換所有工業設備中的控制開關所需花費的金額能因此節省超過 7 兆美元的營運成本。

元件大小：該開關的面積極小。在包含內建的高壓電荷泵與驅動電路在內，僅需要一個 5.2 mm × 4.2 mm 的 LGA 封裝即可。

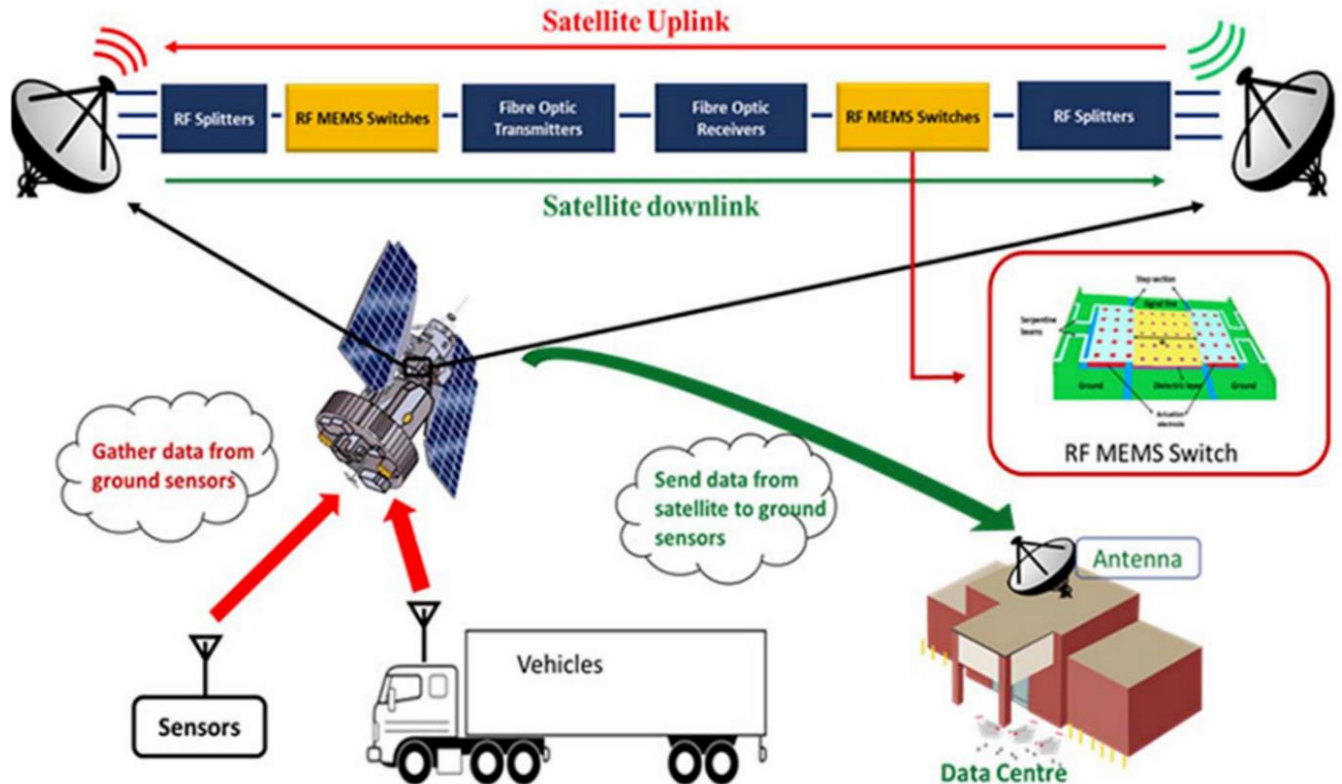
功耗：該開關在操作時僅需消耗小於 10 mW 的功耗。

線性度：其用來判斷傳輸訊號品質的重要指標 – 三階截斷點 (3rd order intercept point, IP3) 線性度 – 可負荷高至 90 dBm 的輸入功率而不會造成避免嚴重的訊號扭曲，使其能夠使用在 5G 網路基礎建設的天線架構中，如圖 2.4.14 所示。



資料來源: <https://menlomicro.com/> (2023)

圖 2.4.13 Menlo Micro 的開關技術具有極低 (<0.02 dB) 的熱切換 (Hot-switching) 插入損耗



資料來源: Design of a novel structure capacitive RF MEMS switch to improve performance parameters (2023)

圖 2.4.14 RF-MEMS 開關於 5G 天線基礎建設中的應用場景，涵蓋了物聯網的感測器資料傳輸、移動載具定位與資料中心之間的溝通

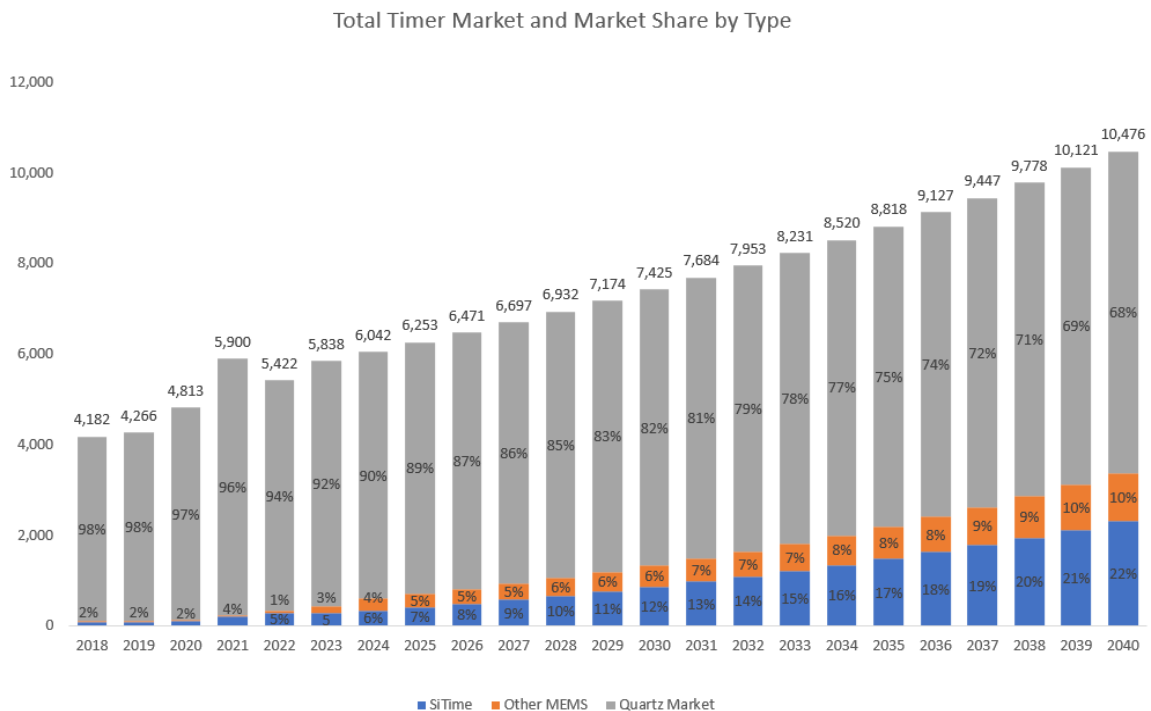
(三) 微機電射頻關鍵元件的市場規模

針對 RF-MEMS 的需求，儘管像是影片串流與訊息傳遞等功能只需要現階段的網路技術便可達成，然而針對這類應用的數據傳輸總量，將從 2020 年的 50 Exabyte 上升至 250 Exabyte，足足有 5 倍之多，加上由於 AR/VR 以及觸覺互聯網的發展所伴隨而來的低延遲通訊，使得 5G 與 6G 的開發與商用化變得相當重要。事實上，5G 通訊技術已經廣泛被智慧型手機採用，驅使了高效能頻帶切換與濾波技術的發展，使得 RF-MEMS 在市場上的消費金額以複合年成長率 12% 的幅度增加，在 2026 年預期可達 40.5 億美元 (Yole Development – Status of the MEMS Industry 2021)。在供應商的市場份額方面，以 RF-MEMS 的濾波技術來說，FBAR 由於具有低插入損耗與好的頻帶外訊號抑制效果，因此仍是高階智慧型手機的最主流濾波技術，BAW 則被中階智慧型手機市場所採納，而 XBAR[®] 技術因較為新穎，正逐漸嶄露鋒芒。RF-MEMS 以公司作區分的市場規模來說，目前以 Broadcom 的 FBAR 濾波器佔最大宗 45%，而後是 Qorvo 以 BAW 2.4 GHz Wi-Fi 的濾波器作為主軸的產品佔了 29%。Qualcomm、Skyworks 與 Resonant

正因各自產品技術的突破而逐間增加其在 RF-MEMS 的市場規模佔比。特別一提的是 Qorvo 收購了 Cavendish Kinetics 使其能夠改善 RF-MEMS 元件製造的技術與可靠度，而在 RF 開關方面，目前仍需要將元件的封裝尺寸進一步縮小，使其能夠成功地打入目標客戶的市場中。目前 Menlo Micro 所開發的 RF-MEMS 開關得到了 1.5 億美元的投資，將使其能加速開發跨世代的 RF-MEMS 開關產品。

(四) 微機電射頻關鍵元件的未來趨勢

在 RF-MEMS 振盪器中，石英振盪元件的市場佔比將逐漸減少，相應的 SiTime 的 MEMS 振盪器在市場上的佔比將逐漸增加，如圖 2.4.15 所示。



資料來源: <https://www.fabricatedknowledge.com/p/its-high-time-to-look-at-sitime> (2023)

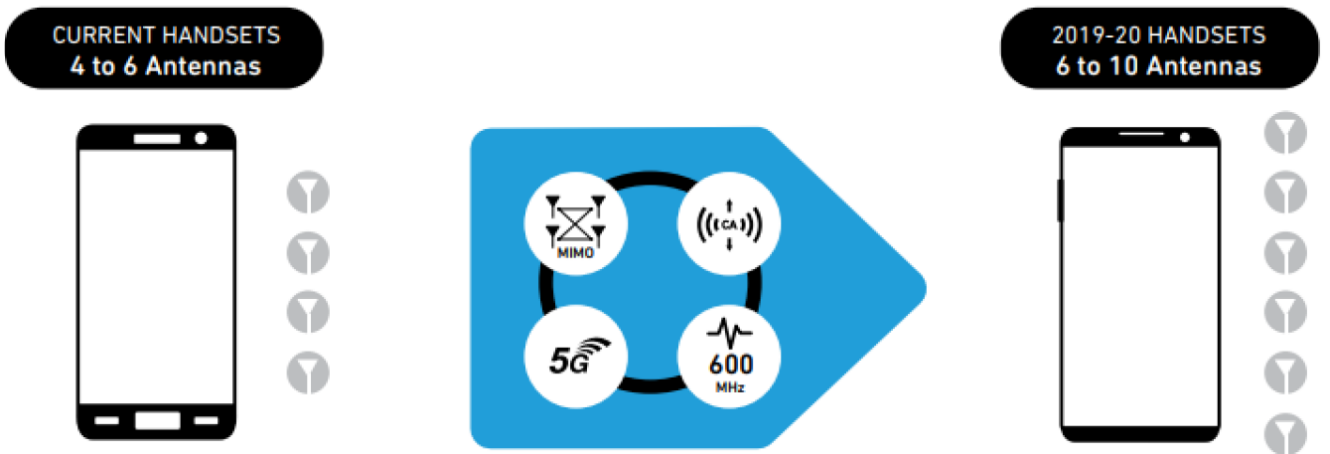
圖 2.4.15 RF-MEMS 振盪器逐年的市場份額佔比變化圖

而在高頻通訊方面，以 5G 來說，主要的影響是在廣泛的範圍內引入新的無線電頻段頻率，範圍從 600 MHz 到 5 GHz。由於該通訊技術需要同時保持 3G、4G/LTE 與 Wi-Fi/藍芽等通訊方式，使得天線數量很快就會增加，如從 4 個到 6 個，從 6 個到 10 個，因此對空間要求會越來越大，如圖 2.4.16 所示。在這樣的情況下，天線需要變得更小，然而這將使得天線的效率與頻寬下降。為了減輕這種影響，天線需要通過調整來使天線能夠在各自的頻帶中達到正確的操作點，以保持天線的最佳性能，而 RF-MEMS 相較於 RF SOI 與 RF CMOS 而言，將會是較佳的天線平台。

高頻通訊的濾波技術方面，SAW 儘管已無法滿足尖端通訊技術的需求，但因其整體而言相較 BAW 技術具有低成本的優勢，因此仍被視為一個足夠好的解決方案，因此 SAW 的市場仍會在未來保持相當可觀的規模，如圖 2.4.17 所示。

另一方面，BAW 為目前高頻與寬頻應用的主要技術，其中 Broadcom 與 Skyworks 等公司所採用的 FBAR 技術儘管製造成本較高，但因其具有最好的性能而適用於高階的終端產品。Qorvo 與 TDK 等公司的 BAW 技術則被中階的產品所採用，相應的成本也較 FBAR 為低。其他如 Akoustis 的 XBAW™ 與 Resonant 的 XBAR® 等基於 BAW 的新穎技術也正逐漸成長，如圖 2.4.18 所示。

More Antennas, Less Antenna Area = Tougher Challenge



資料來源：Yole (2022)

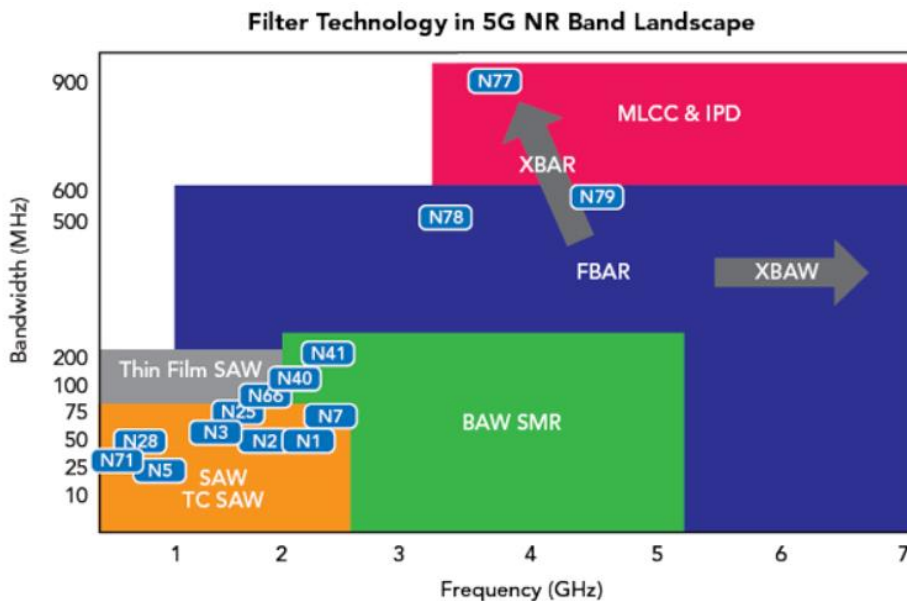
圖 2.4.16 未來通訊技術將需要更多的天線來滿足多頻段的需求

Acoustic Filter Technology Overview

SAW	TC-SAW	TF-SAW	BAW-SMR	BAW-FBAR	BAW-XBAR
Lateral Propagation			Vertical Propagation		
Application					
4G	4G	4G/5G)	4G/5G	4G/5G	4G/5G
Cost (- High Cost, + Low Cost)					
+++	++	+	+	-	(Est.) ++
Process Steps (+ Complex, - Simple)					
-	+	++	+++	++	+++
Structure					
Air Cavity	Oxide	Air Cavity	Air Cavity	Air Cavity	Air Cavity
Single Crystal Piezo	Single Crystal Piezo	Single Crystal Piezo	Polycrystal Piezo	Polycrystal Piezo	Polycrystal Piezo
		Backside Parasitic	Backside Parasitic	Air Cavity	Air Cavity
Substrate					
Single Crystal Piezo	Single Crystal Piezo	Piezo on Insulator	Silicon	Silicon	Piezo on Insulator

資料來源：<https://www.microwavejournal.com/articles/print/34710-intensifying-technology-competition-in-the-acoustic-wave-filter-market> (2023)

圖 2.4.17 現階段濾波技術之比較，SAW 具有低成本的優勢，而 BAW 可應用在高頻頻段



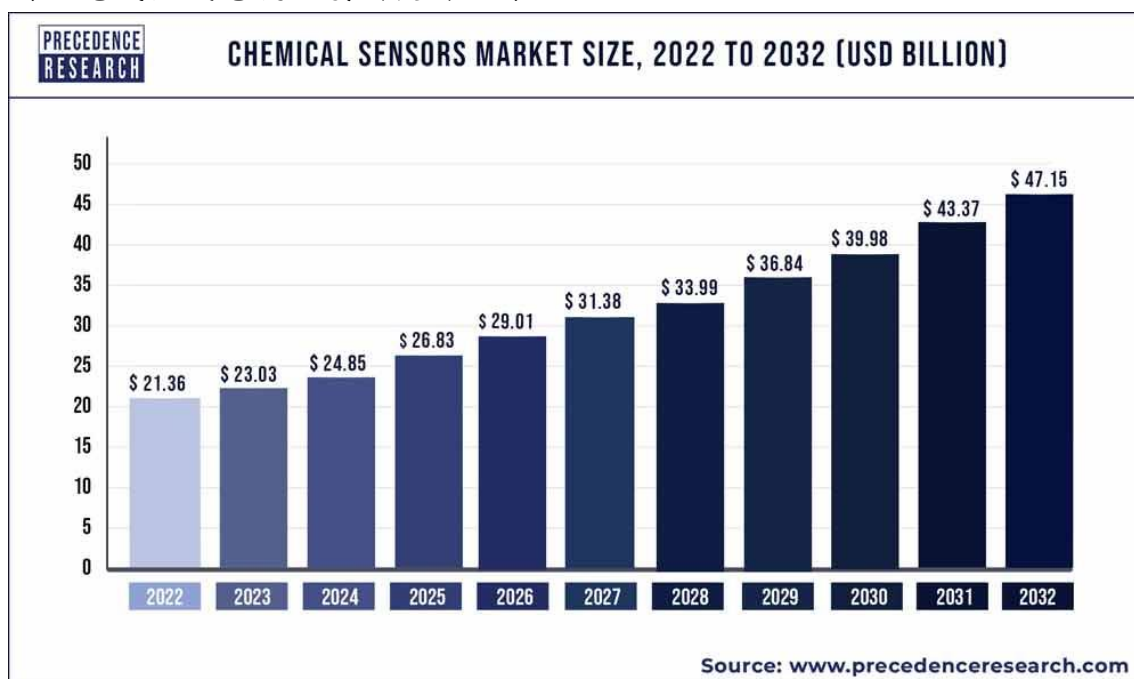
資料來源: Intensifying Technology Competition in the Acoustic Wave Filter Market (2023)

圖 2.4.18 RF-MEMS 濾波技術將朝更高頻與更寬頻的方向發展

五、環安衛檢測應用

(一) 微機電化學感測技術

因應計算與通訊技術的蓬勃發展，智慧化系統也隨之成為次世代應用技術的重要發展方向之一，比如智慧製造技術、智慧物流技術、自駕車技術以及智慧生活等，而相關技術與系統最重要的就是蒐集目標資料、傳送、分析及反饋，在諸多組成技術之中，相當重要的一部分即為感測資料的蒐集。為了與應用場域密切結合，微機電技術即成為感測元件技術之發展方法之一，一般而言，感測技術主要分成物理和化學感測兩個主要方向，傳統物理感測已經藉由微機電技術的發展成功的落實於日常生活之中，如加速度感測元件與紅外線感測元件；在另一方面，自西元 2000 年之後，越來越多的學者亦將微機電技術引入於化學感測技術的研發上，部分微機電化學感測技術亦開始應用於實際場域中，使得許多技術分析報告對於接下來的微機電化學感測元件的市場成長充滿期待，如圖 2.5.1 所示。為了進一步說明相關技術的代表性發展，將以近年頗受重視的氣體感測應用為例，針對壓電式微機電氣體感測技術進行說明。



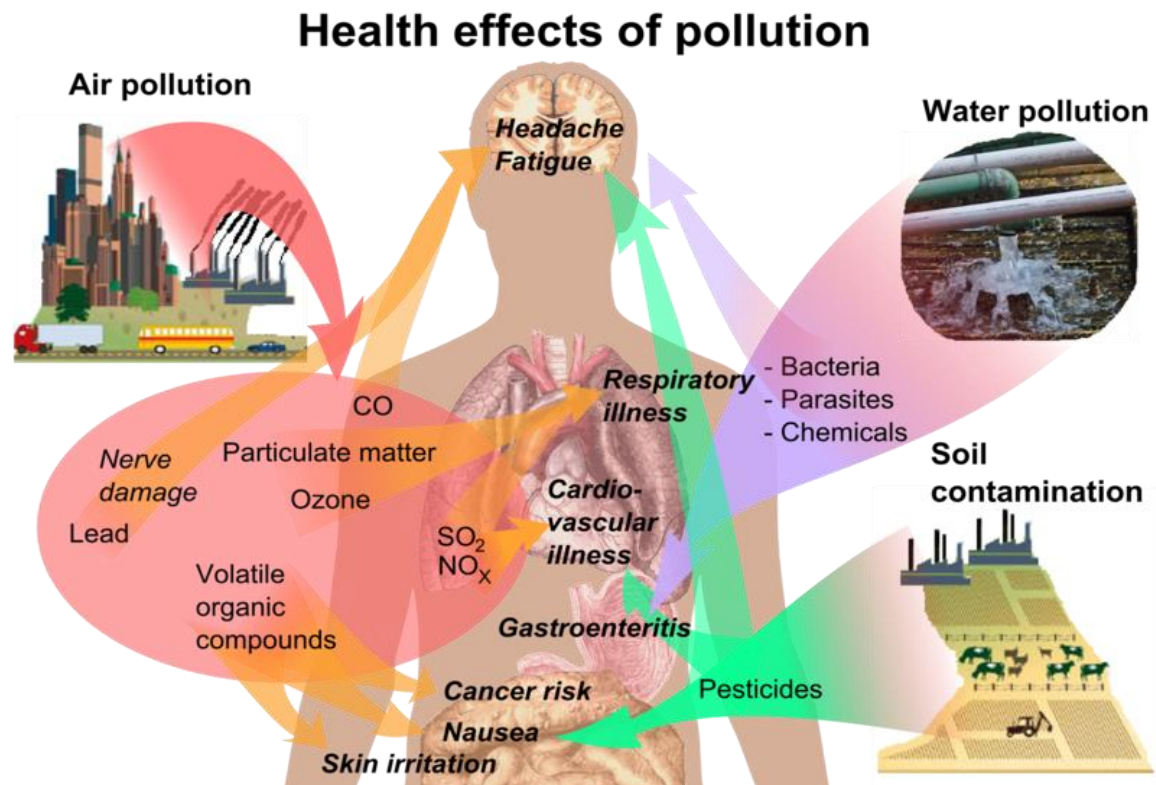
資料來源：<https://www.precedenceresearch.com/chemical-sensors-market> (2023)

圖 2.5.1 全球化學感測器市場預估 (2022-2032)

全球化學感測器市場於 2022 年約為美金 213 億元，預期會於 2032 年達到美金 472 億元，複合年均成長率為 8.3%。其中，主要的應用市場在於空氣品質與健康照護上，在未來的十年內，將廣泛地運用微機電相關技術進行發展。

1. 微機電化學感測技術應用背景

自從費曼提出奈微米技術的前景後，奈微米製程技術持續地蓬勃發展，使得微機電系統技術亦隨之起飛在成功地開發出物理式感測元件後，如加速規(加速度計)及壓力計等；另一方面，近年來針對健康照護的相關研究與討論亦清楚地指出環境汙染對於健康有著嚴重的影響，如圖 2.5.2 所示，因為不健康的環境所造成的死亡是一般暴力行為(如戰爭)所造成人類死亡數量的 15 倍，而傳統高靈敏性氣體檢測技術一般是採用氣態層析儀(gas chromatography)、分光光度儀(spectrophotometry)或是高效液相層析儀(high-performance liquid chromatography)來進行，然而相關標準技術皆受限於體積、操作時間與設置成本，導致相關技術無法滿足現階段對於環境監測的密度需求，亦無法滿足未來對於智慧生活環境中數量與耗能的要求。因此，微型化學感測元件亦隨之受到重視，近年來大量的學者投入與智慧環境息息相關的氣體感測元件研究，如利用微機電製程進行二氧化碳感測元件、二氧化硫感測元件或二氧化氮感測元件。



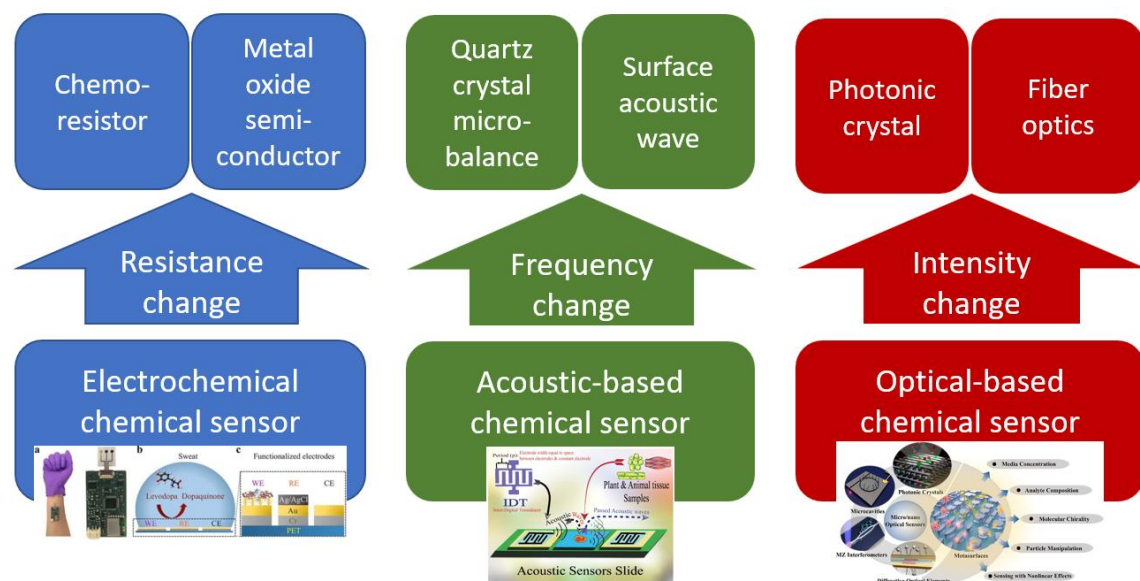
資料來源：https://en.wikipedia.org/wiki/Pollution#Human_health (2023)

圖 2.5.2 環境汙染物對於健康的影響示意圖

2. 微機電化學感測技術簡介

利用微機電技術進行化學感測技術發展最大的利基就是其具有小形

態因子(small form factor)、低耗能(low power consumption)及低製作成本(low fabrication cost)的優勢，使得相關技術所發展的感測元件可以緊密地(seamlessly)符合未來對於智慧環境的期待。一般利用微機電技術主要是製作特殊設計之基板(substrate)或具特定功能之結構，如微型電極幾何形狀設計或是低導熱結構設計等，再配合對於待測目標，如氣體分子或是生物標靶分子等，具有特定結合的材料提高對待測目標的專一性，來進行微機電化學感測元件之研發。而近年來微機電化學感測技術的發展主軸可以其感測機制簡單地分成：(1)電化學方法；(2) 聲學振動方法；(3) 光學方法，如圖 2.5.3 所示。相關發展軸向可以簡介如下：

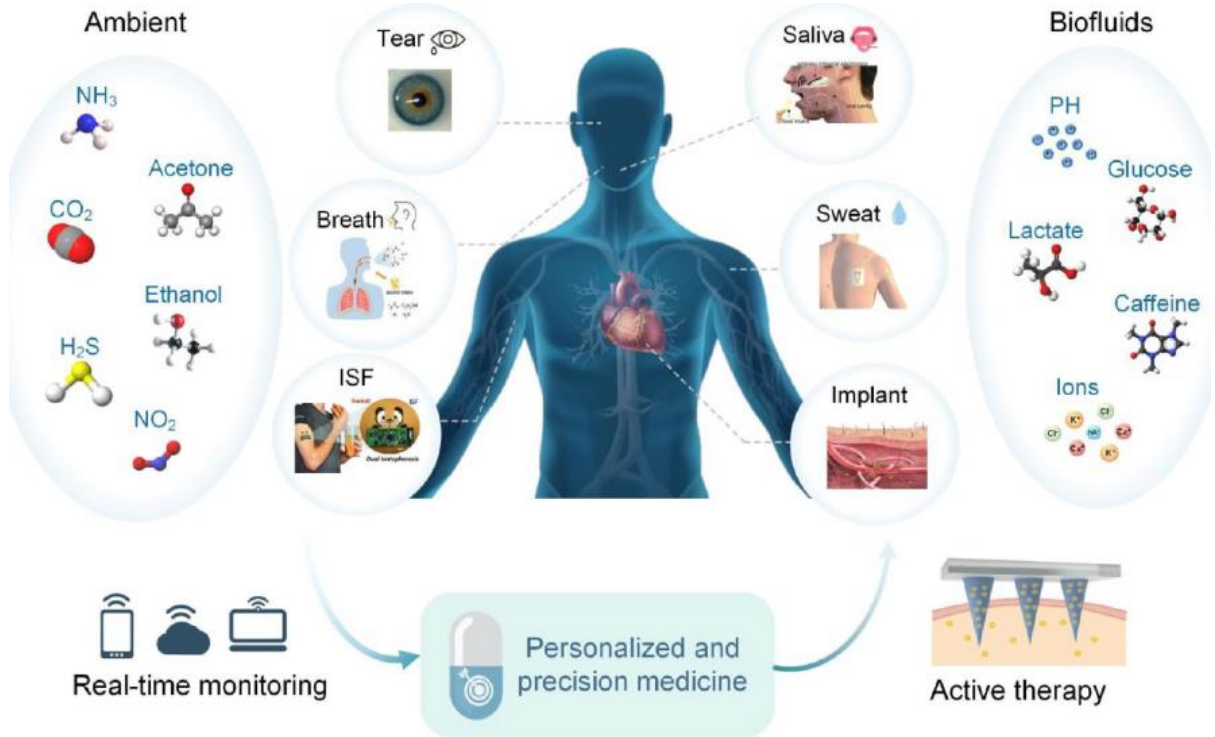


資料來源：Microsyst Nanoeng. (2023); Sens. Actuators B Chem. (2022); ACS Nano (2022)

圖 2.5.3 微機電化學感測機制

採用電化學方法的微機電化學感測技術可以進一步依據感測機制分成金屬氧化物半導體式與化學電阻式兩種基本的化學感測方式。其中，金屬氧化物半導體式的微型感測技術主要著重於感測材料(如氧化鋅 ZnO 或氧化鈦 TiO₂ 等)的研發，在微機電技術上，則是著重於微型電極的設計與降低熱傳導的結構設計等，主要是因為金屬氧化物與待測之目標分子之電化學反應主要依靠較高的溫度提供能量進行反應，經過反應後，金屬氧化物半導體材料內的載子(carrier)數量會有所變動，使得相關感測材料的電阻值產生變化，據以進行相關目標分子的量測；而化學電阻式的微型感測技術基本架構上與金屬氧化物半導體式大致相同，除了化學電阻式因為感測機制的不同，不需要有加熱的機制，所以在微機電設計與製作上，亦相對較為簡易，相關的技術發展著重於感測材料的研發與塗佈，如導電性聚合

物或是具奈米結構之材料(MOF, Metal-Oxide Framework), 而易於以微製程技術進行製作的特性, 使相關技術可進一步與穿戴式電子裝置(wearable electronics)進行整合應用, 如圖 2.5.4 所示。

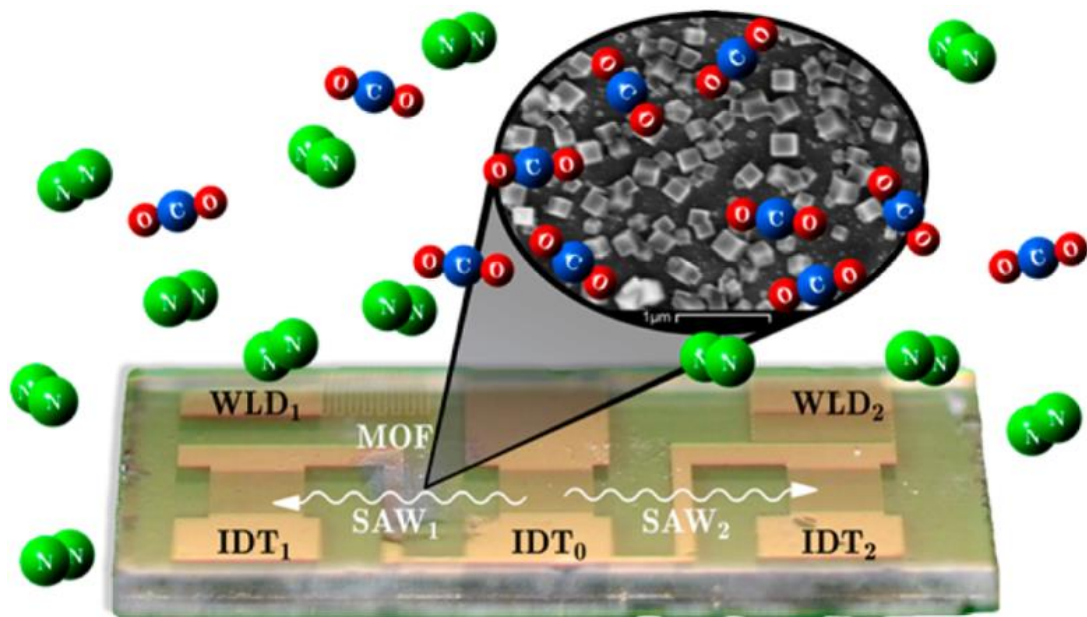


資料來源：Anal. Chem. (2023).

圖 2.5.4 穿戴式微機電化學感測示意圖

利用聲學振動方法的微機電化學感測技術亦可以依據其感測基板的特性分成體聲波的石英晶體微天秤(QCM, Quartz Crystal Microbalance)技術與表面聲波感測技術(SAW, Surface Acoustic Wave)。而其基礎的感測機制為利用其機械性共振所產生之固態聲波進行量測, 因為相關固體振動與固態聲波的傳遞受到周遭環境的條件影響, 將會產生振動頻率的變化, 由此就可以知道是否有檢測到待測之化學分子。其中, 石英晶體微天秤技術一開始是源自於電子產業中所必須要有的時脈振動源: 石英振盪器, 利用石英振盪元件所產生之共振頻率(resonance frequency)對於黏附於表面的材料質量(mass)與材料剪切係數(shear modulus)十分的敏感, 所以可以利用塗佈於石英振盪器上面的化學分子吸收材料來吸附目標分子, 在相關感測材料吸附目標分子後, 其質量或機械性質的改變將可以直接反應於石英振盪器的共振頻率偏移(frequency shifting), 由此感測化學分子的濃度。值得說明的是石英晶體微天秤技術需要較複雜的製程技術與較佳的訊雜比處理技術, 才可能提高其最低檢測濃度至一般環境監測應用之所需。在另一方

面，表面聲波振動技術則是以壓電材料(piezoelectric materials)作為基板，利用指叉式電極(interdigital electrodes)產生並接收表面聲波的傳遞，因為表面聲波在傳遞的時候，對於貼附於表面的分子層較體聲波更為敏感，利用此一特性，諸多研究學者將感測材料塗佈於聲波元件的發射電極與接收電極之間的表面上，即可以對感測材料是否有吸附目標分子進行檢測，如圖 2.5.5 所示，若是表面聲波元件的振動頻率產生偏移，則可以推估吸附之目標分子濃度。在這一方面的發展上，壓電材料基板與指叉式電極所構成之表面聲波元件則為主要的微機電研製方向之一，配合不同的感測材料，如金屬氧化物、聚合物及奈米材料等，針對不同的化學分子進行量測。

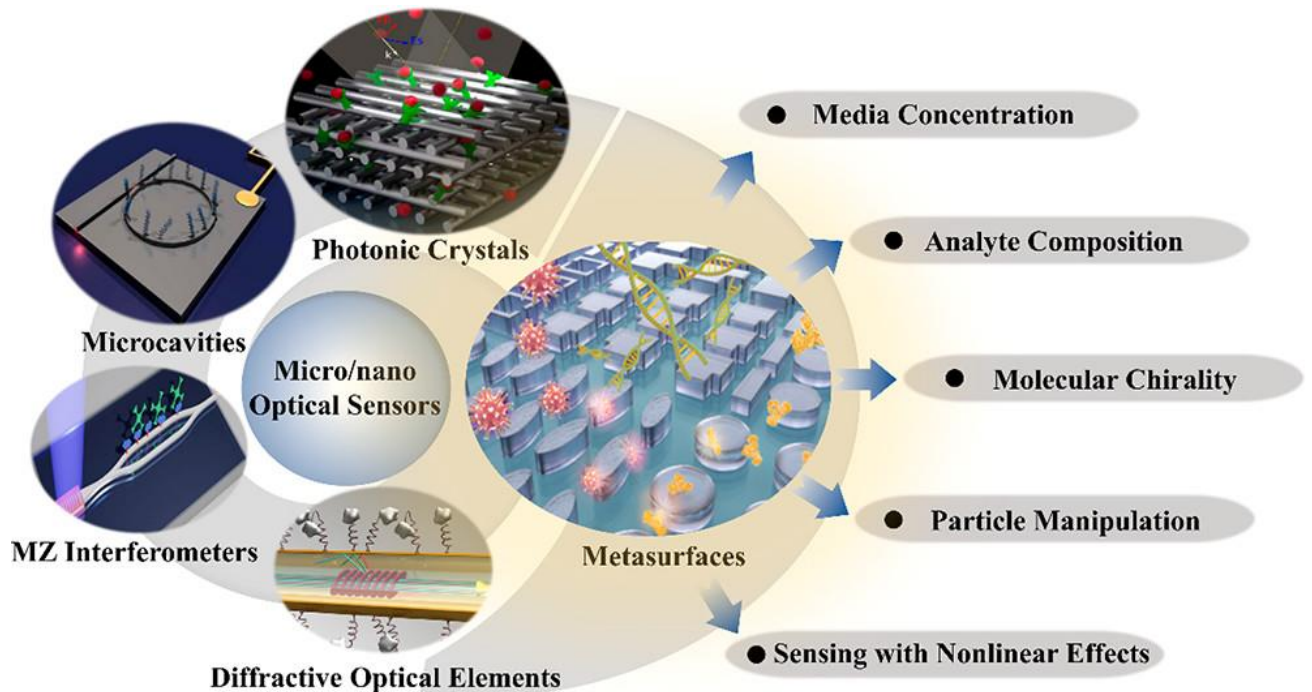


資料來源：ACS Sensors (2017)

圖 2.5.5 表面聲波感測元件示意圖

使用光學方法進行化學物質的監測是傳統標準檢測方法之一，大部分皆採用吸收或透射/反射光譜的方式進行量測，而微機電技術即是將相關架構利用晶片技術微縮以損失些許精準度進而取得小體積與低成本的優勢。相關利用微機電架構之光學化學感測技術可以概略的分成光子晶體腔 (photonic crystal cavity) 技術與光纖 (fiber optics) 技術。其中，光子晶體腔技術主要是利用週期性 (periodicity) 的介電材料 (dielectric materials) 結構來影響光子運動的行為，所以，在特定的結構中，特定頻率的光將無法傳遞，利用此一特性，若有化學分子黏附的光子晶體腔，即因為其結構上的改變，導致此一光子晶體的頻譜有所變化，如圖 2.5.6 所示。於此技術中，光子晶體的品質因子 (quality factor) 與感測靈敏性 (sensitivity) 為兩個主要的設計參數，一般而言，光學晶體化學感測技術具有較佳的靈敏性與穩定性，而在

此一技術上，微機電技術主要是進行光子晶體的設計與製作。在另一方面，光纖技術利用光在纖芯(core)及包覆層(cladding)的接面上產生全反射(internal reflection)的現象來進行光訊號的傳遞，所以，在此一接面上的光學性質變化都將造成光訊號傳遞的變化，以此現象為基礎，將部分的光纖包覆層移除，並以感測材料取代，則可以利用感測材料吸附化學分子時所造成的光學性質變化，改變此一光纖的光訊號傳導特性，進而達到感測的效果在此一光纖感測技術上，微機電技術主要可以使用來進行相關光纖介面的設計與製作，如利用法布立-佩羅干涉結構(fabry-perot interferometry)或漸逝波(evanescent wave)的設計設計來提高感測靈敏度，此外，感測材料亦為相關光纖感測技術的研發方向之一，不同的奈米粒子與材料混入金屬氧化物或聚合物形成不同的感測材料皆可提高化學感測效果。



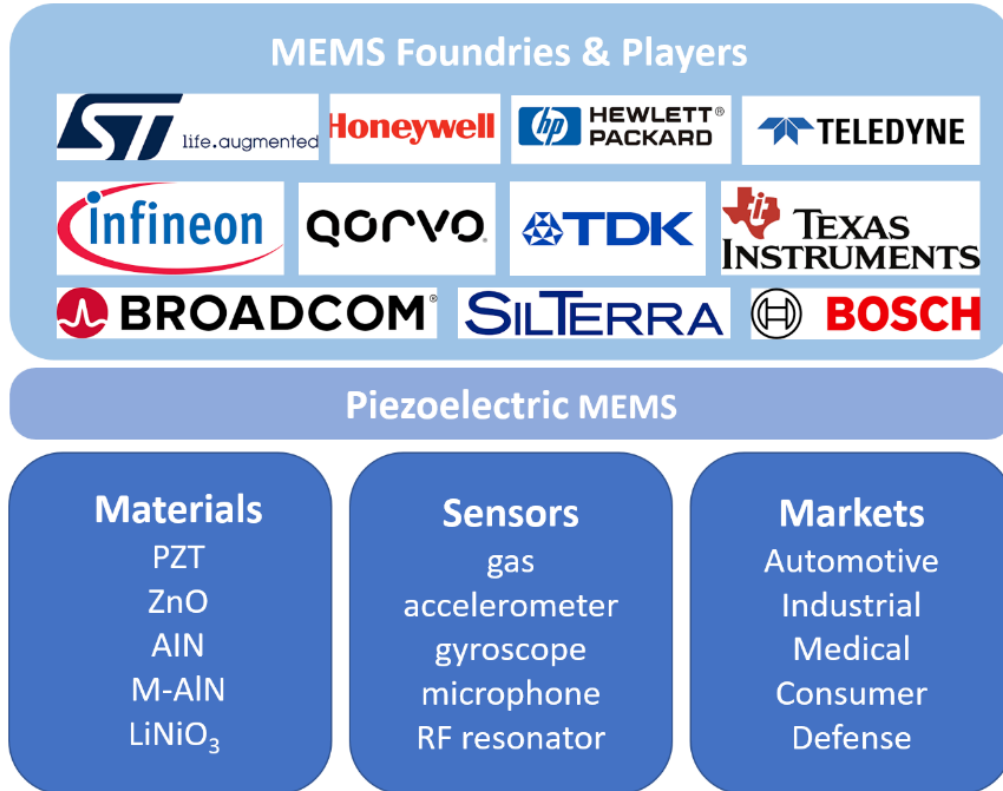
資料來源：ACS Nano (2022)

圖 2.5.6 利用奈微米機電技術之光感測技術的發展

3. 壓電式微機電氣體感測技術

壓電式微機電技術廣泛地運用在各種應用之中，如壓電式微懸臂樑元件(piezoelectric microcantilever)應用於奈米等級表面量測技術、表面聲波元件(SAW)應用於微質量量測技術、壓電超音波換能元件(PMUT, Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducer)應用於醫用超音波系統及薄膜體聲波共振腔元件(FBAR, Film Bulk Acoustic wave Resonator)應用於高頻振盪器技術等，使得壓電式微機電技術在近年來微機電相關領域受

到極大的重視，有鑑於此，在國際相關微機電產業上，亦漸次投入相關技術之研發，如圖 2.5.7 所示，同時，化學感測技術中的氣體感測技術因其應用市場日益受到重視，所以，針對壓電式微機電氣體感測技術做一基本的介紹。



資料來源：Google (2023)

圖 2.5.7 壓電式微機電感測技術材料、應用、市場及相關廠商

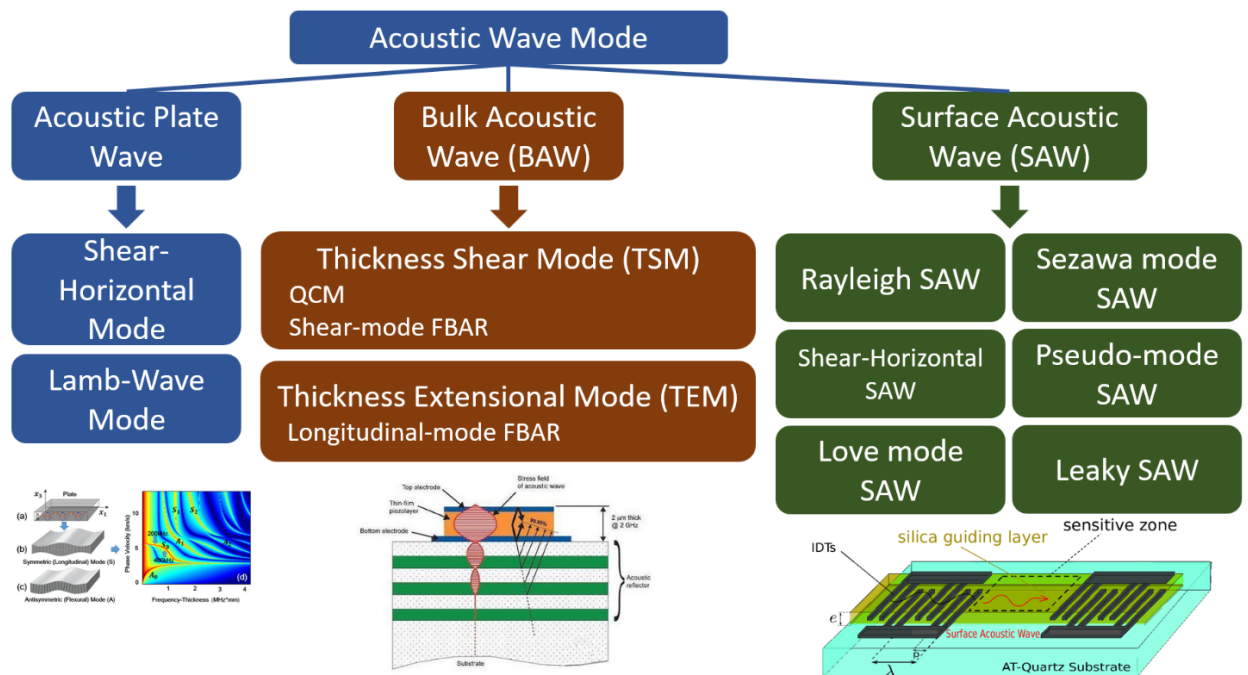
(1) 氣體感測元件重要的基礎特性

在氣體感測應用之中，相關感測元件研發的重要性能指標主要在於感測靈敏性(sensitivity)：感測元件訊號變化與待測氣體濃度變化的比例、感測選擇比(selectivity)：感測元件對於目標氣體靈敏度與非目標氣體靈敏度的比例、感測最低濃度極限(limit of detection)：感測元件所能感測的最低目標氣體濃度、重複性(repeatability)：感測元件對於同一濃度之目標氣體所輸出的訊號的一致性、穩定性(stability)：感測元件輸出訊號隨著操作時間變長的變化量、操作溫度(operation temperature)：感測元件可正常運作的溫度區間、反應時間(response time)：當有危害的目標氣體分子擴散到感測元件後感測元件發出警告訊號所需要的時間、能耗(power consumption)：感測元件操作所需要的能量及成本(cost)：製作感測元件所需要的成本。而對於一個完整的氣體感測模組而言，不僅感測元件本身，介面電路系統亦影響

上述重要指標的表現。

(2) 壓電式振動元件簡介

壓電材料具有將機械能與電能做交互轉換的材料，即當材料產生形變的時候，可以產生出相對應的電子訊號，反之亦然，可以驅動電子訊號使得壓電材料產生形變，甚或輸入交流電子訊號使得壓電材料產生週期性的形變-振動，因此，此種材料廣泛地使用在各種應用於感測上的換能元件 (transducer)。因應各種不同的方式產生機械能的變化，如壓力、拉力或剪力等，壓電式振動元件可以依據其振動的方式大致上分成：體聲波 (bulk acoustic wave) 及表面聲波 (surface acoustic wave)，並可進一步依據其振動的方式細分為各種壓電式振動元件之發展，如圖 2.5.8 所示。不同的振動模態具有不同的振動特性，對於不同的感測標的物也就有不同的表現，一般而言，應用在氣體感測之上主要是依靠氣體分子吸附後，改變結構振動時的邊界條件進而對其共振頻率所成影響，所以，在大氣環境下具有的品質因子越高，其感測靈敏性越好，同時，也必須注意到相關結構振動設計對於環境中其他參數，如氣壓、溫度及濕度的影響。



資料來源：Discover Nano (2023)

圖 2.5.8 壓電式振動元件各種波傳模式之分類

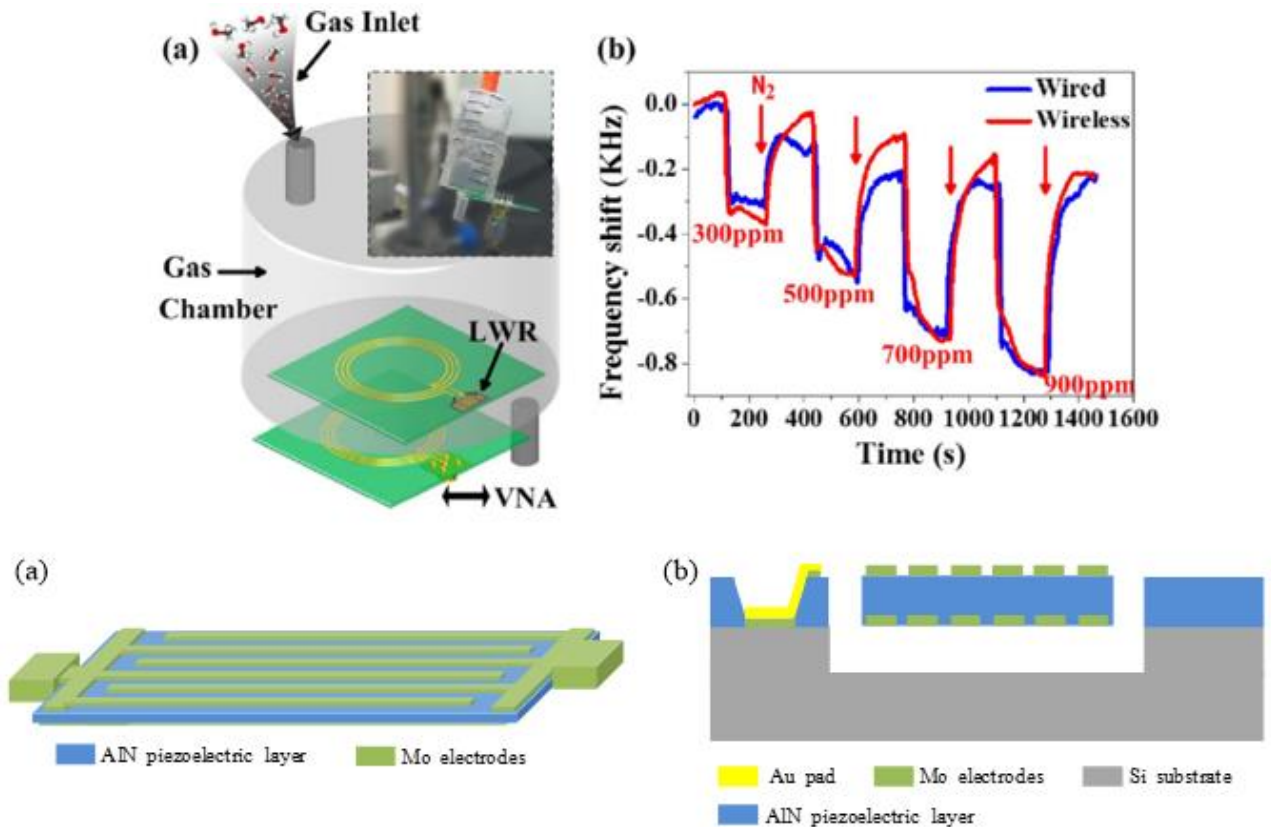
(3) 壓電式微機電氣體感測技術

上述相關壓電式振動元件皆可與氣體感測材料整合後發展成為氣體

感測元件，因此，以微機電技術平台的研發而言，具有相當程度的通用性，適合作為微型氣體感測模組發展的基礎技術，以下進一步針對上述各項壓電式振動元件模態所研發之壓電式微機電氣體感測技術進行說明：

A. Lamb-Wave Mode：

利用標準矽基材，於其上沉積氮化鋁(AlN)之壓電材料以製作壓電薄膜，並利用鉬(Mo)進行指叉式電極的製作，如圖 2.5.9 所示，有別於其他壓電式微機電氣體感測的研究，本研究並未於壓電薄膜上進行表面改質，直接以此一壓電式感測元件成功地量測乙醇(Ethanol)之氣體分子，由此可知，氣體分子的吸附確實對於壓電振動薄膜的共振頻率造成影響，然而，若是沒有適當的表面改質，此一氣體感測元件的選擇性將不容易達到應用的需求。



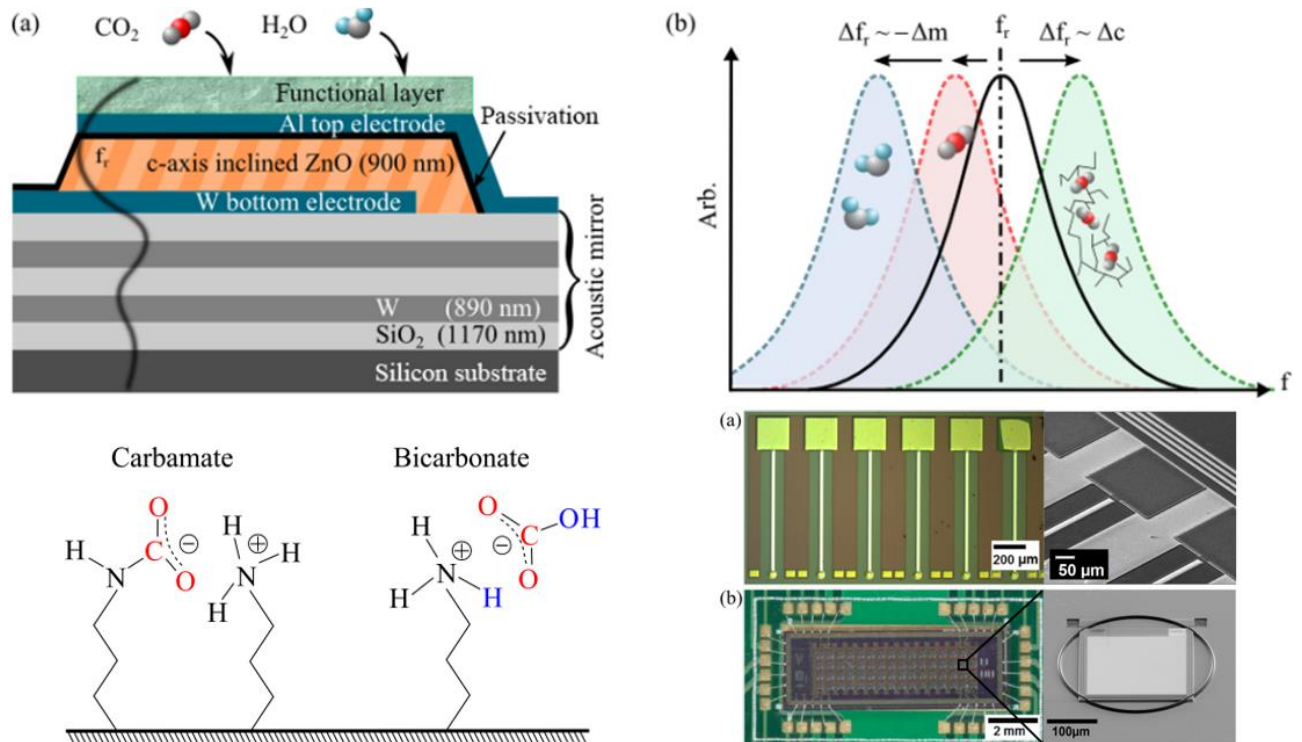
資料來源：Appl. Phys. Lett. (2016)

圖 2.5.9 利用 Lamb-Wave mode 所研發之無線式氣體感測模組

B. Bulk Acoustic Mode：

在諸多體聲波元件技術中，近年來，薄膜體聲波共振腔(FBAR，Film Bulk Acoustic Resonator)從原本以無線射頻振盪元件為主的應用中，進一步

拓展至感測元件應用技術，利用其高品質因子的特性與易於標準半導體製程技術整合的優點，將相關元件與感測材料整合或進行表面改質，即可作為氣體感測元件使用。舉例而言，德國研究學者 Hoffmann 等人，於標準矽基材上，直接沉積二氧化矽(SiO₂)/鎢(W)的堆疊作為聲波反射層後，於其上利用氧化鋅(ZnO)作為壓電材料，建構出薄膜體聲波諧振腔元件，如圖 2.5.10 所示，再於其上塗佈易於二氧化碳(CO₂)吸附的矽氧樹脂(polysiloxane)作為感測材料，其成功的展示了同時進行二氧化碳與水氣的感測，達到 400 ppm 的一般室內二氧化碳濃度檢測需求。雖然，此一感測技術因為採用聚合物作為感測材料基底，導致其於穩定性及重複性上的表現無法滿足應用的需求，然而，搭配近年來興起的金屬有機框架材料(metal-organic framework)，將有機會進一步提高其感測能力與穩定性。



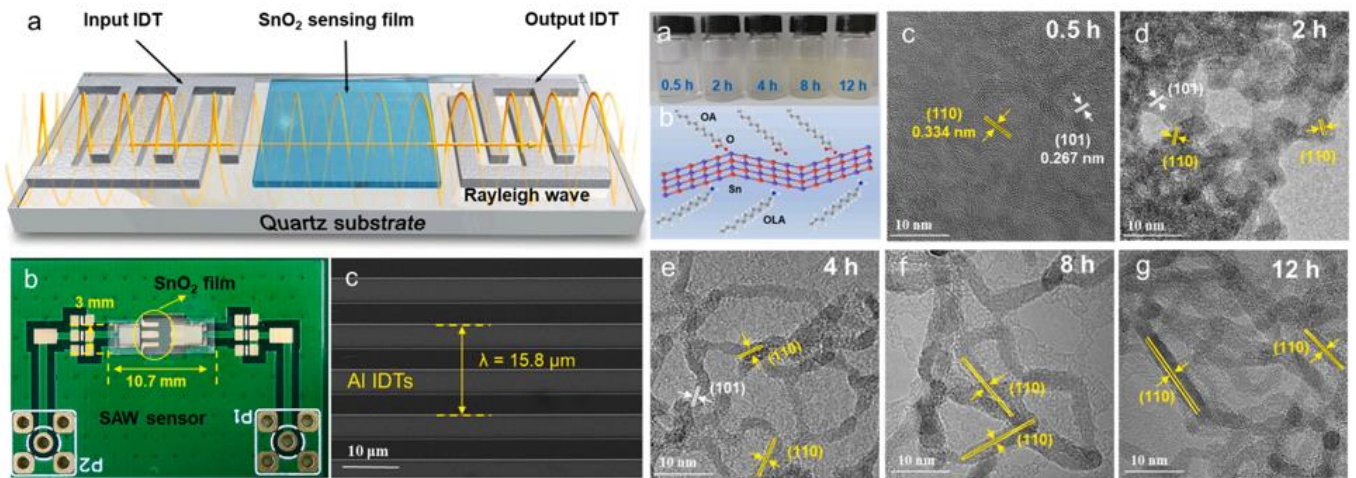
資料來源：J. Sens. Sens. Syst. (2017)

圖 2.5.10 利用薄膜體聲波諧振腔元件作為二氧化碳感測元件

C. Surface Acoustic Mode：

表面聲波元件已有諸多針對氣體感測應用的研究成果，因為其共振態較不易受到空氣分子黏滯係數的影響，使其共振的品質因子較一般機械振動元件(如石英振盪器)為佳，此一特性亦使相關表面聲波元件於感測特性上具有相當優秀的表現，近年來，相關表面聲波氣體感測元件的研發主要是針對元件上塗佈之感測材料或表面改質技術，使相關氣體感測更具有

良好的靈敏性與選擇比。舉例而言，以 ST-cut 石英作為壓電基材來降低溫度對於感測的影響，而於石英基材上即可以利用鋁製作指叉式電極，實現具有 4000 以上品質因子的表面聲波振動元件，再利用旋轉塗佈的方式將二氧化錫(SnO_2)奈米線塗佈於相關元件的上方並進行熱退火後，作為二氧化氮(NO_2)的感測材料，如圖 2.5.11 所示，相關研究實驗成果展現 0.5 ppm 的感測能力與良好的重複性及選擇比。相較於傳統的電化學阻抗式的感測機制，以表面聲波元件進行感測元件的研發具有易於整合於無線化被動感測與較低耗電的優勢，亦使得相關壓電式微機電氣體感測元件技術優於其他標準微型感測架構。



資料來源：Sens. Actuators B Chem. (2022)

圖 2.5.11 利用表面聲波元件與二氧化錫感測材料進行二氧化氮的感測

4. 新世代微機電化學感測技術之應用

微機電技術於上一個世代以物理性量測(如：麥克風、加速度及角加速度等)為研發主軸，與資通訊技術協力推展了行動化平台(mobile platform)產業技術的發展，於短短二十年，將智慧化互動式個人電子產品帶入使用者視野成為日常生活之必須。在資通訊技術持續發展之下，物聯網及人工智慧技術蓬勃發展之際，對於環境安全與智慧化生活的期待，更進一步的推升對於次世代微機電感測技術與產品的需求，而相關感測技術的發展，近年來已轉而針對化學感測技術進行研究發展，舉例而言，微機電氣體感測技術與微機電生物標靶分子感測技術等，發展主軸為利用微機電技術將高性能、低成本與小體積的化學感測元件導入應用，如圖 2.5.12 所示，建構更為安全與便利的社會環境。

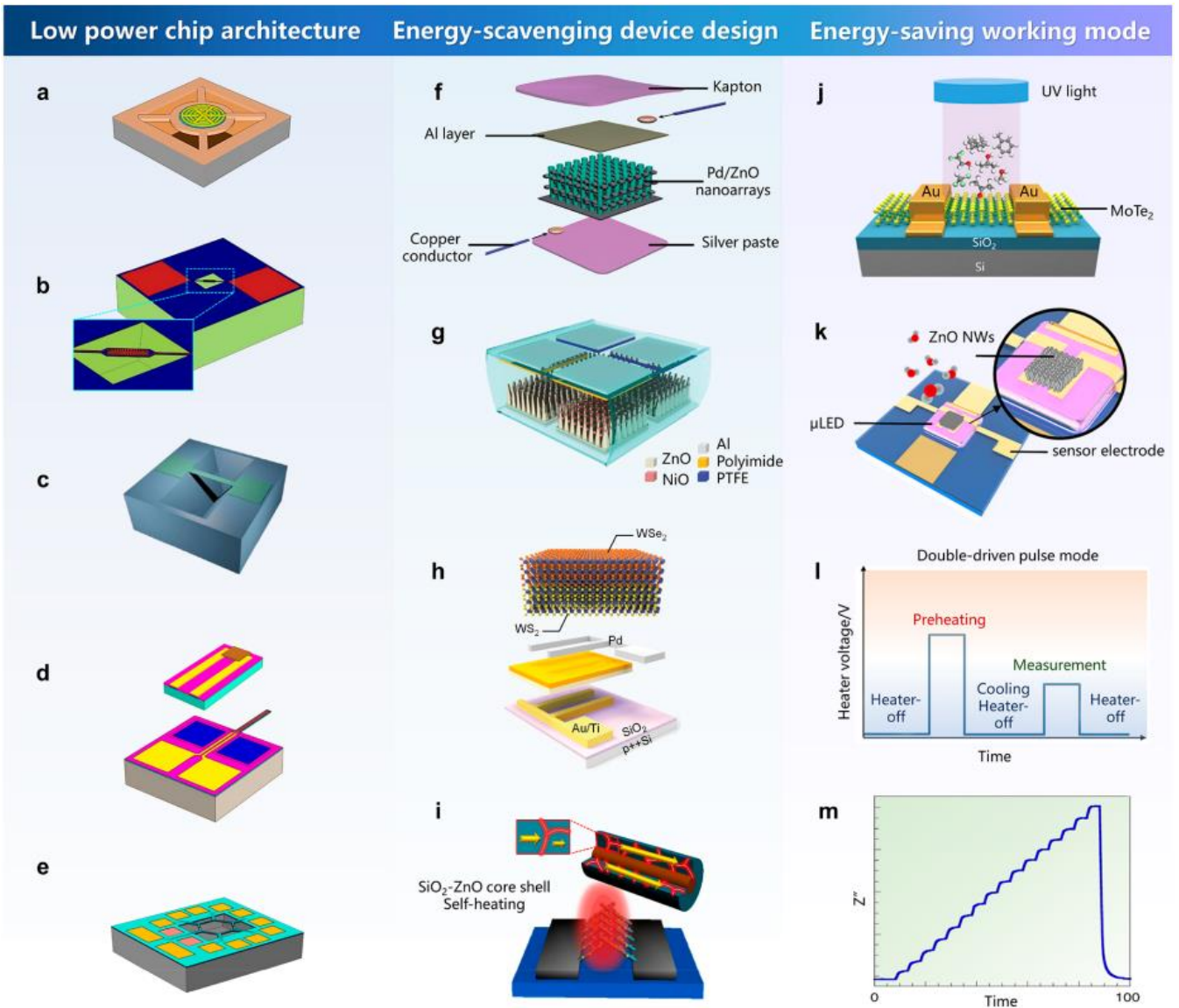


資料來源：<https://www.nature.com/> (scientific reports); Google (2023)

圖 2.5.12 微機電化學感測技術於下一世代的應用發展

在眾多次世代微機電化學感測技術應用中，電子嗅覺可以說是一個重要的指標性技術，因為同時感測各種氣體分子在眾多的日常生活應用之中，如環境監測、健康檢測與室內空氣品質控制等是不可或缺的。相關人工電子嗅覺系統早在數十年前就由科學家利用數種傳統固態電解式氣體感測器來分辨不同的氣味，從那時開始，人工嗅覺系統的研發即成為相關氣體感測系統中重要的發展方向之一。近年來由於微機電式氣體感測元件技術的發展，如微型金屬氧化物氣體感測技術、微型化學電阻式導電聚合物氣體感測技術、表面聲波式氣體感測技術與微型光學氣體感測技術等，更進一步的推展人工電子嗅覺系統進入硬體架構整合的領域，將感測元件、介面電路、類比數位轉換電路、微處理晶片、記憶體與無線通訊晶片等整合為一完整的人工電子嗅覺模組，如圖 2.5.13 所示。同時，隨著人工智慧演算法的進步與資通訊技術的發展，邊緣計算(edge computation)能力大幅提升，除了可以在模組內進行基礎低階的資料處理，如雜訊濾除或基線飄移移除等，亦可以進行進階的資料處理工作，如分類、辨識及學習等，亦使得人工電子嗅覺系統的發展臻至進入實際應用驗證的階段。

在人工電子嗅覺系統技術的發展上，現階段在學術研究上，奠基於過去微機電系統技術的研究成果，相關微結構設計與感測運作機制之基礎學理已有較為完整的認知，因此，功能性材料與表面改質技術為微機電化學感測技術的主要研究發展方向之一；在另一方面，有鑑於人工智慧演算法的快速發展及邊緣計算能力的長足進步，如何將人工電子嗅覺演算法落實於低耗能計算平台上即成為另一個研究發展的方向；此外，更低能耗的微機電化學感測元件技術亦是發展的重要方向之一，如圖 2.5.14 所示。



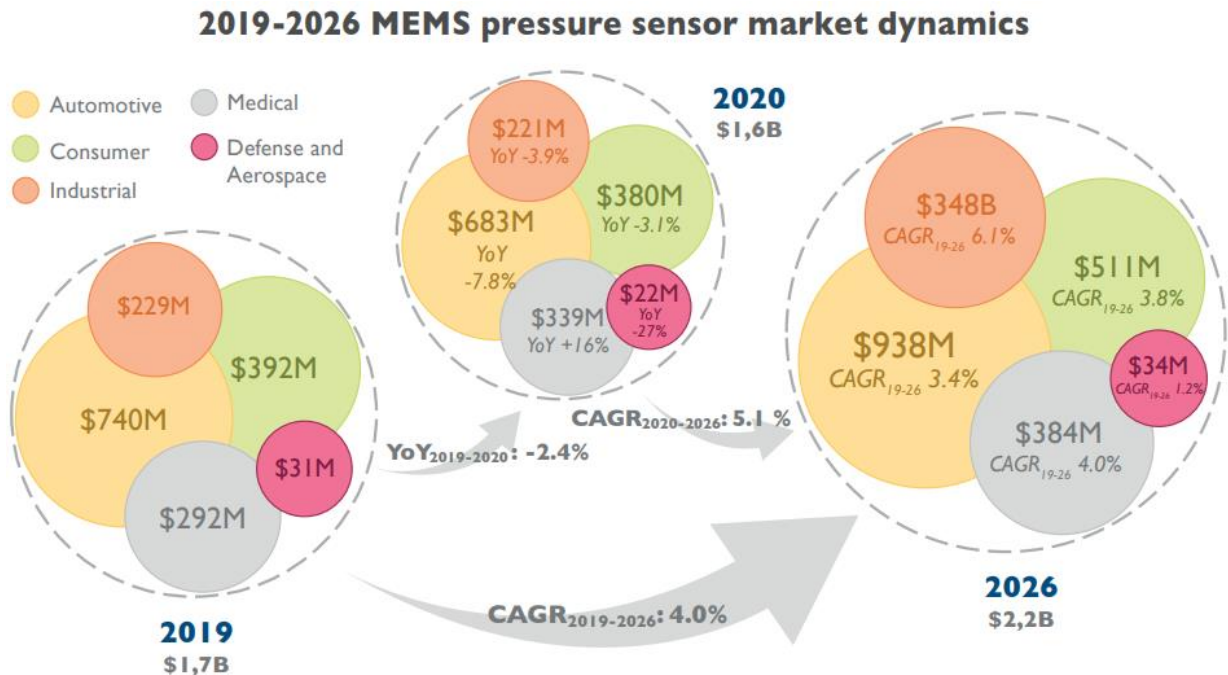
資料來源：ACS Nano (2022)

圖 2.5.14 次世代低功耗微機電化學感測技術發展策略

(二) 微機電壓力感測技術

壓力感測元件在 2022 年的市場價值約為美金 187.3 億，在到 2030 年以前預估之複合成長率為 4%，其中，根據調查報告微機電壓力感測元件市場於 2023 年達到美金 23.6 億，而於 2028 年預估為美金 31.9 億，預估複合成長率為 6%。之所以可以在市場上保持動能，不但是傳統壓力感測應用需求擴增，如：家電狀況監控、車輛狀況監控與工業安全監測等，更因為微機電技術提供更低能耗、更小尺寸、更高性能的壓力感測元件，使得應用市場迅速擴展至運動健康產業與智慧穿戴應用，如圖 2.5.15 所示；舉例而言，Bosch Sensortec 針對家用市場及穿戴式應用發表壓力感測元件

BMP384，以壓阻式微機電技術製作之氣壓計，而 Samsung 亦針對手機市場推出整合式壓力感測技術，相關應用產品需求使得許多市場調查研究對於微機電式壓力感測元件保持正面的態度。因此，將針對微機電壓力感測技術做一基礎的說明，並以穿戴式應用說明新世代微機電壓力感測元件的應用。



資料來源：Yole (2021)

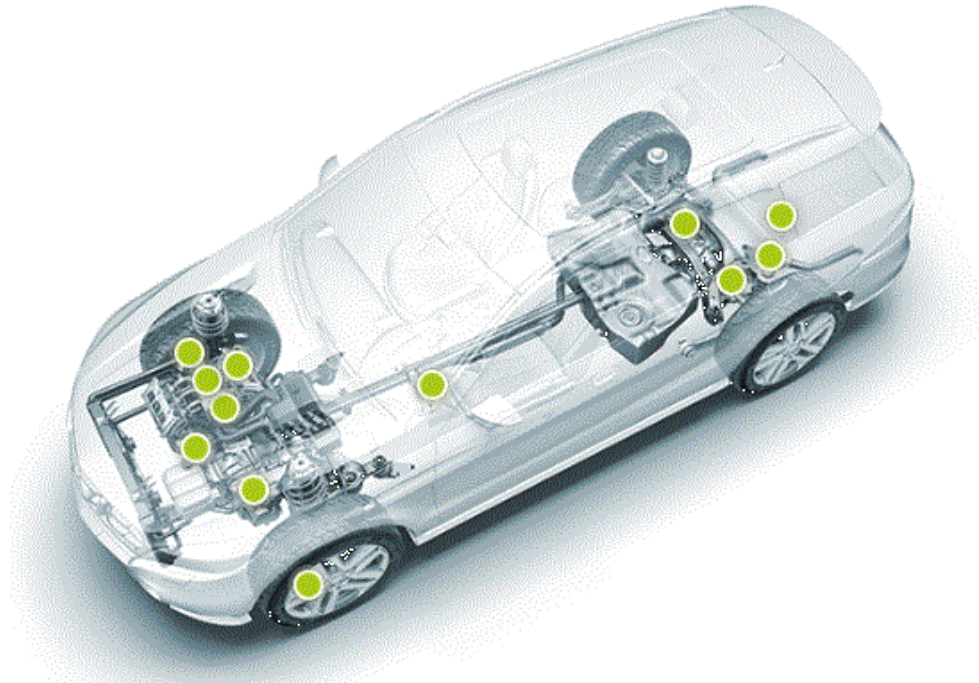
圖 2.5.15 全球微機電壓力感測元件市場預估 (2019-2026)

Yole 於 2021 年估計全球微機電壓力感測元件市場於 2026 年約為美金 22 億元，而根據 Mordor Intelligence 於 2023 年的報告說明微機電壓力感測元件市場於 2023 已達到美金 23.6 億。

1. 微機電壓力感測技術應用背景

微機電壓力感測技術從 1980 年代即開始有學術研究進行，在相關技術發展初期，主要目標市場是汽車產業及國防軍工業，如圖 2.5.16 所示，主要用於引擎與傳動系統，如進氣壓力感測器(MAP, Manifold Absolute Pressure sensor)、油氣壓力感測器(fuel vapor pressure sensor)、燃油蒸氣排放感測器(carbon canister pressure sensor)、機油壓力感測器(engine oil pressure sensor)及胎壓計(TPMS, Tire Pressure Monitoring System)等，相關壓力感測元件通常都需要能承受高溫或是高壓的極端環境，故具有較高的售價，雖然近年來因為電動汽車技術的推展，使得此一市場的成長性受到威脅，然而，因微機電技術隨著半導體產業的長足進步，低耗能、微型化

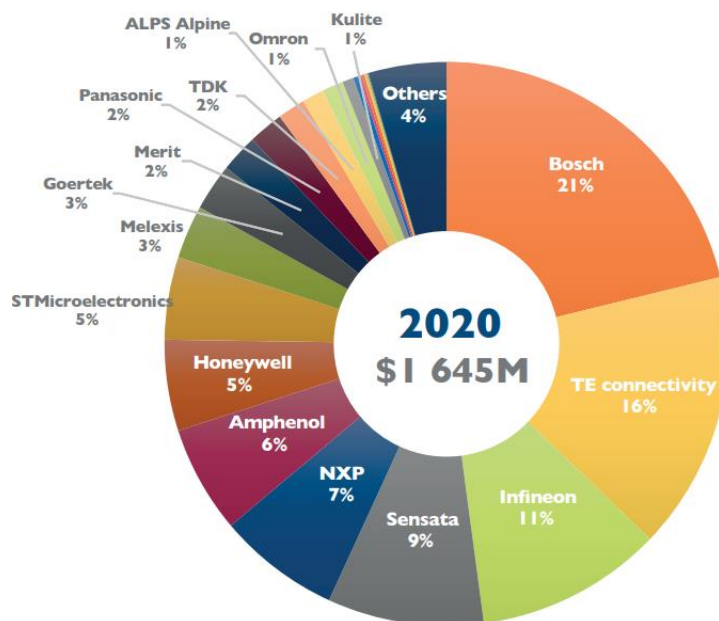
及具有更好成本效益的微機電壓力感測元件發展亦進入消費性電子產品，提供氣壓與高度等感測資訊給行動電子平台，諸如智慧手機或無人機等，更進一步，微機電壓力感測元件亦進入健康醫療器材市場，如量測血壓或心導管等。



資料來源：<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=16961> (2023)

圖 2.5.16 在車用傳動系統中需要使用微機電式壓力感測元件示意圖

2020 MEMS pressure sensor players revenues (\$M)



資料來源：Yole (2021)

圖 2.5.17 2020 年微機電壓力感測元件廠商於應用市場的佔有率

因應微機電壓力感測技術已發展超過三十年，傳統上應用產業的市場結構已然漸趨穩定，傳統的應用市場主要為車用及工控兩大市場，佔據相關市場的前三大廠商分別為 Bosch Sensortec、TE Connectivity 及 Infineon Technologies，這三家廠商技術主要在於車用及消費性電子應用，約佔據近半的市場價值，亦在現有的技術架構建立起適當的進入障礙(entry barrier)，使得近年來較少新興的廠商進入此一微機電壓力感測市場。然而，值得注意的是，因應電動車輛(electrical vehicle)的發展、軟性微機電技術的發展及對於新興醫療照護技術的需求，使得微機電壓力感測技術市場有著新的變動，突破性創新的契機依然存在，亦是相關產業技術發展的重要關鍵。

2. 新世代微機電壓力感測技術之應用

微機電壓力感測技術一方面因應傳統於智慧自動化環境與工業 4.0 的發展，在準確性、可靠性及耐久性上需要更進一步的研發，在早期破壞或預防性維護等監測都具有更多的應用場域；此外，工業 4.0 及物聯網技術以無處不在的感測元件提高自動化程度並降低工安意外，亦帶來微機電壓力感測元件在量產上的需求；而汽車產業傳統上作為微機電壓力感測器的主要市場，在科技上亦有長足的進步，對於壓力感測器的應用需求已從原本傳動系統監測轉化為提高行車安全、行車舒適與行車娛樂等應用，這些汽車產業的新應用皆著眼於微機電壓力感測器所具有小尺寸與低功耗的特點，凡此種種，都持續地為微機電壓力感測元件帶來成長的動能。而在新世代微機電壓力感測技術應用中，值得一提的是醫材壓力感測應用及軟性壓力感測應用兩方面，以下針對這兩種新興的微機電壓力感測應用做一簡單的說明。

(1) 微機電壓力感測元件於醫療器材上的應用

醫療器材與健康照護技術的需求近年來因為人類壽命的延長而快速增長，微機電壓力技術因其具有尺寸優勢，並且，在相關醫療與健康應用上，壓力參數於眾多生物指標(biomarker)中皆屬於重要的生理參數，使得利用微機電技術所製作的壓力感測元件於相關應用上受到重視。而傳統上的可應用於醫療器材上之微機電壓力感測技術主要是利用四種機制進行設計與量測：

A. 壓電式感測機制(piezoelectric mechanism)：此一機制利用壓電材料所製作的微結構在壓力變化時，所導致的微機電結構變化，此一變化所產生的應力會因材料本身晶格非對稱的特性而產生感應電荷，量測這些感應電荷

所累積的電流將可以利用微結構設計所求得之關係式推算出壓力。其中，壓電材料可以為石英(quartz)、鋇鈦酸鉛(lead zirconium titanate)、氧化鋅(zinc oxide)、鉭酸鋰(lithium tantalate)或聚偏二氟乙烯(polyvinylidene fluoride)等，其主要優勢在於感測元件耗電量低，適合導管或植入式醫療器材使用，然而，其主要缺點在於無法量測靜壓力且不容易與標準 CMOS 製程進行整合。

B. 壓阻式感測機制(piezoresistive mechanism)：此一機制利用感測元件微結構在壓力變化時所造成的電阻變化來感測壓力。此一感測機制之材料可以為高參雜之多晶矽或其他導電性材料，其主要優勢在於可以量測靜壓力或動態壓力變化、容易與標準 CMOS 製程進行整合，且其介面電路易於設計，雖然其感測靈敏性(sensitivity)不如壓電式壓力感測機制，然而，具有更好的線性度(linearity)及較少的遲滯現象(hysteresis)，有利於量測的應用；而其主要的缺點在於此一感測容易受到溫度的影響且耗能較高。

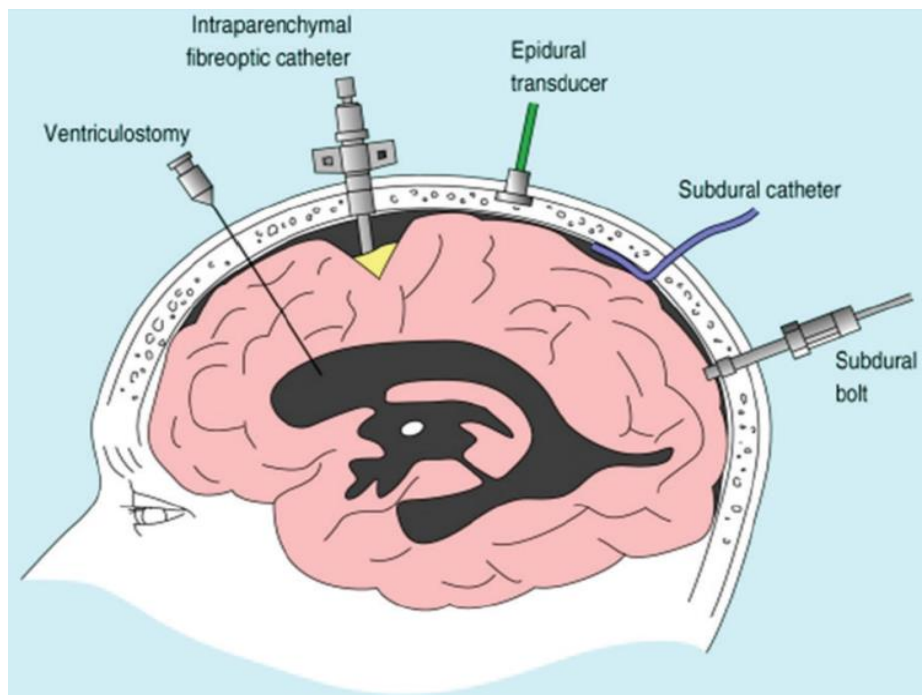
C. 電容式感測機制(capacitive mechanism)：此一感測機制為最早發展的微機電壓力感測元件所使用的機制，其利用微結構設計薄膜，當因壓力而改變薄膜與基材的距離時，即可以利用此一距離變化所導致的電容變化來量測壓力。而電容式壓力感測主要技術在於微機電薄膜的結構設計，利用不同的薄膜直徑與厚度來設計可量測之壓力，其主要的優勢在於可以量測靜壓力或動態壓力變化、容易與標準 CMOS 製程進行整合、耗電量低且較不易受到溫度的影響，然而，其主要的缺點在於介面電路設計較為複雜，且需耗費較大的面積來取得較好的精準度，而其元件與介面電路的寄生電容(parasitic capacitance)及雜散電容(stray capacitance)亦限制量測的靈敏度。

D. 光學式感測機制(optical mechanism)：此一感測機制利用微機電技術所製作出的薄膜，因為壓力變化所產生的結構型變導致光學特性(如：光強度、相位、波長、頻率及光偏極態)的變化來達到量測壓力的目的。此一機制可以量測靜態或是動態的壓力變化，其主要的優勢在於高靈敏性與解析度(resolution)，而主要的缺點在於光機整合的體積較為龐大，且介面電路或是光纖耦合技術等都會造成其量測的誤差，而缺乏溫度補償的機制亦導致此一壓力感測機制受限於雜訊(thermo-mechanical noise)的影響。

(2) 相關微機電壓力感測元件現階段於醫療上的實際應用

A. 顱內壓監測 (intracranial pressure monitoring)：因為顱骨的限制，顱內總體積是保持定值，而此一體積中約 80%為腦組織(brain)、約 10%為腦髓液

(cerebrospinal fluid)及約 10%為腦血流體積(cerebral blood volume)。因此，當因為撞擊造成腦髓液及腦血流體積增加時，即會造成顱內壓力(ICP, Intracranial Pressure)的上升，壓迫到腦組織使腦組織受到損害，所以，保持正常的顱內壓力是非常重要的，而顱內壓的監測也就成為腦部創傷後治療重要的監測參數，所以，相關醫療壓力量測醫材也蓬勃發展，如圖 2.5.18 所示，然而，傳統的量測方法因為需要進行侵入式的直接量測，導致容易造成傷口感染與顱內出血等狀況，因此，可植入式的微小化壓力感測器即成為相關醫材重要的關鍵性元件，現階段已有一些新創公司針對相關的需求發展無線式壓力監測元件來進行顱內壓的量測，如 Integra Lifescience、Codman、Gaeltec 及 Spiegelberg 等。



資料來源：J. Neuroanaesth. Crit. Care (2015)

圖 2.5.18 現行顱內壓監測醫療器材示意圖

B. 心血管壓力監測(cardiac pressure monitoring)：血壓是重要的生理參數之一，因此，許多醫療器材技術都針對相關血壓的量測進行開發，其中，心血管壓力的異常皆會導致心臟的疾病，如中風(stroke)或心肌梗塞(myocardial infarction)，所以，心血管壓力的量測尤為重要。現階段，植入式微機電式心血管壓力量測醫療器材已有相當多團隊投入研發，如 ImPressure™ 及 EndoSure™ 等，然而，相關臨床試驗仍在進行中。

C. 骨科壓力監測(orthopedic pressure monitoring)：骨頭間(如脊椎及關節)的壓力量測對於相關病症的治療極為重要，舉例而言，脊椎間的壓力量測可

以提供對於椎間盤病變或下背痛等症狀治療的重要參考依據；而關節壓力的監測更可以協助骨科手術的預後判斷，因此，亦有不少研究團隊或新創公司投入相關技術之發展，如 Intellirod-Sping™, Zimmer GmbH 及 MicroStrain Inc. 等，如圖 2.5.19 所示。



資料來源：<https://www.intellirodspine.com/>, <https://www.zimmer-group.com/de/>, <https://www.microstrain.com/> (2023)

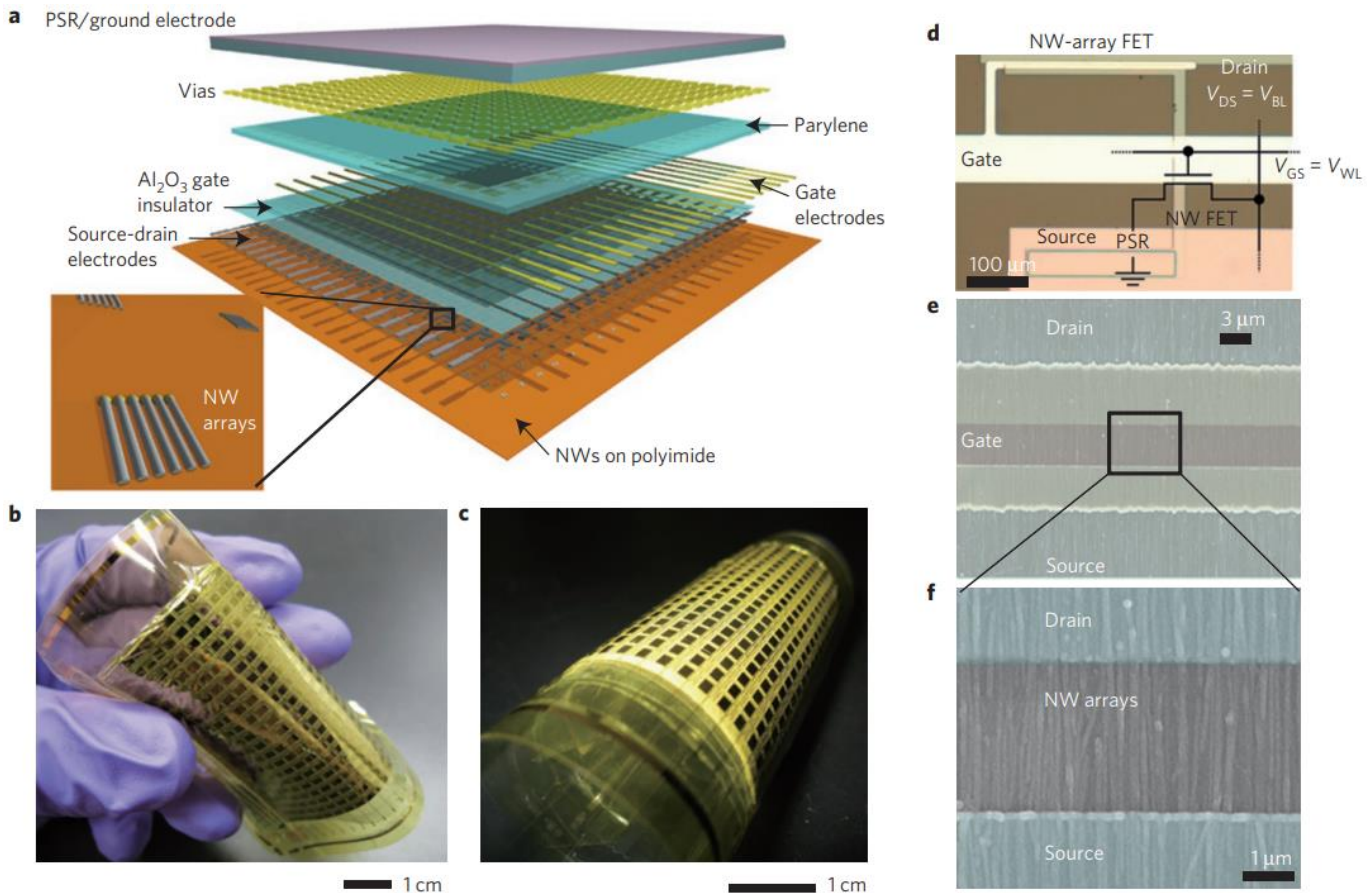
圖 2.5.19 各新創團隊骨科壓力監測原型示意圖

D. 膀胱壓力監測(bladder pressure monitoring)：尿失禁(urinary incontinence)已然成為老年化社會中常見的疾病之一，此一病症亦嚴重地影響到生活品質，因此，適當的醫療器材技術協助診斷相關病症即因為應用市場需求而受到重視。傳統上，膀胱壓力的量測是利用導管伸入尿道或直腸，利用排尿時所產生的壓力來進行檢測，此一方法不但因為侵入時造成患者不舒服，並且需要專業的醫療人員進行，無法有效地進行監測。所以，利用微機電壓力感測技術進行研發相關醫療器材也就成為發展方向之一，現階段僅 CardioMEMS 成功地將相關醫療產品商業化，然而，尚待臨床進一步的驗證。

(3) 微機電壓力感測元件於可撓性基材上的應用

近年來，隨著智慧生活科技與物聯網技術的蓬勃發展，傳統微機電式壓力感測技術也從工業與車用的監控需求，進入民眾一般日常生活需求之中，開展了全新的應用模式，其中，可撓性壓力感測元件(flexible pressure sensors)因其具有高度柔軟性的同時，亦具有傳統微機電壓力感測元件的高靈敏性、小尺寸、高解析度與即時反應等特性，即成為新世代微機電壓力感測技術重要的發展方向之一。以微機電技術研發可撓性壓力感測元件較具有代表性的是 2010 年日本學者 Takei 等人於所發表的人工皮膚的研發成果，如圖 2.5.20 所示，而後相關研究方向即引領許多研究學者相繼投入，

研究方向主要著重於可以具有更良好靈敏性、更高解析度與具有多種量測(如溫度與壓力)的擬人化觸覺感測技術(tactile sensing)，以應用於智慧健康照護應用及機器人工智慧感測應用。而微機電壓力感測元件技術所使用的四種基本感測機制：壓電式壓力感測、壓阻式壓力感測、電容式壓力感測及光學式壓力感測等，皆可應用於可撓性壓力感測技術中，故相關感測機制不再贅述。

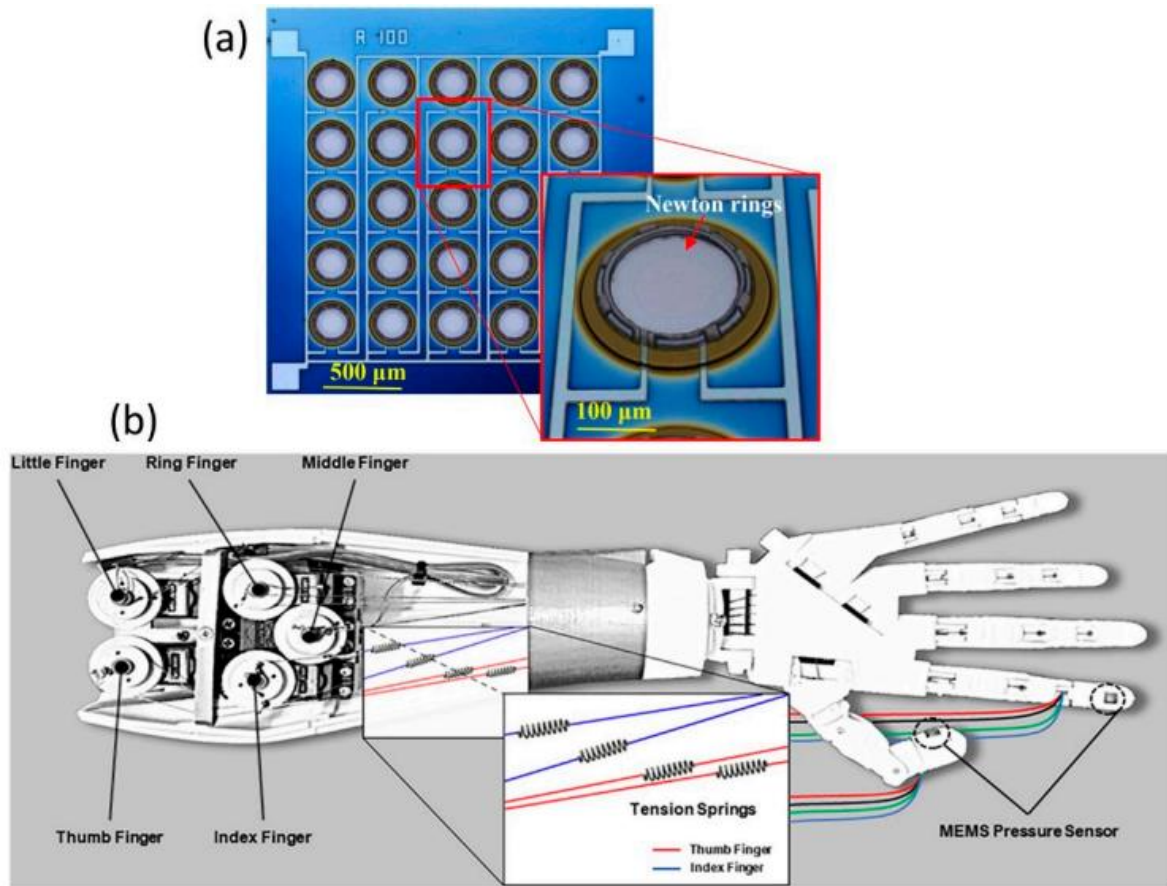


資料來源：Nat. Mater. (2010)

圖 2.5.20 利用噴印半導體奈米線所製作的人工皮膚壓力感測研究

以商用化傳統的微機電壓力感測元件(barometric pressure sensors)整合於可撓性基板(flexible substrates)為相關可撓性壓力感測應用發展進行的方式之一，如圖 2.5.21 所示，因相關標準矽製程技術發展已臻成熟，而微機電設計與製程持續技術的發展，亦使其具有更小的體積與更好的壓力感測表現，同時可與介面電路進行整合的特性，達到量產之需求，使此一方法成為傳統微機電壓力感測技術切入可撓性壓力感測應用的優勢。然而，將微機電壓力感測晶片直接整合於可撓性基板上，在人工皮膚觸覺感測上主要的挑戰在於滑動感測及二維/三維陣列感測的能力，在學術研究上，可利用演算法進行測算，但尚未見將此方式實際使用於相關可撓性感測應用之

上。在另一方面，因為異質整合微機電技術的發展，奈米材料及有機材料等具可撓特性的材料得以整合進微機電壓力感測技術，使具有可撓性、可延展性及可貼合特性的新興大面積可撓性感測技術受到產學研學者的重視，而此種可撓性觸覺感測機制考量異質材料接合與介面讀取電路整合的發展，主要採用的感測機制以電容式感測為主，因此，接下來將針對可撓性電容式壓力感測技術做為新世代壓力感測應用的介紹。



資料來源：Micromachines (2022)

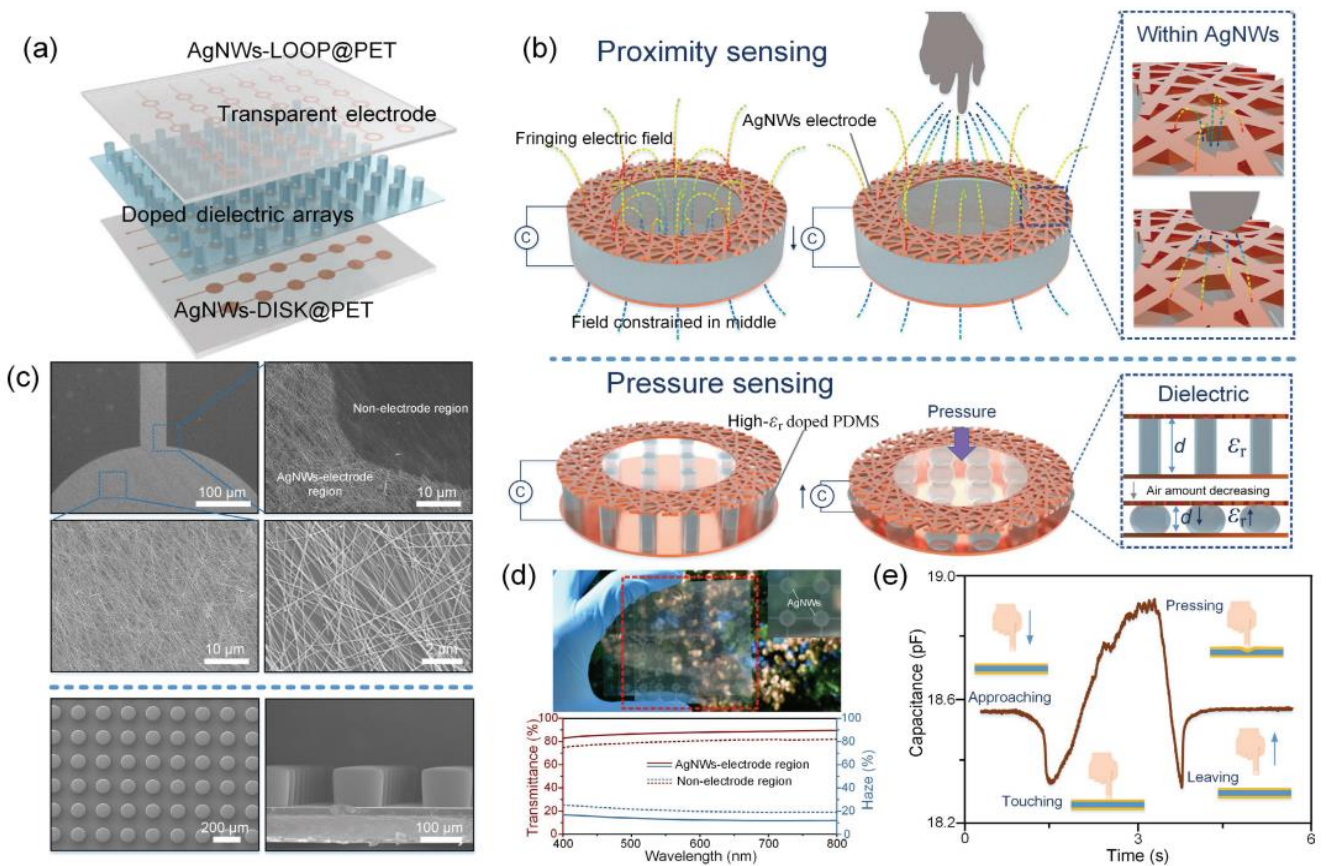
圖 2.5.21 整合點式微機電壓力感測元件於人工觸覺感測示意圖

異質整合可撓性電容式壓力感測技術因具有大製程面積、適用於觸覺感測的壓力靈敏度及較不易受到溫度影響等優點，使相關技術的研發吸引許多研究學者的投入，然而，相關技術尚未見商用化量產應用的產品，故相關技術研究發展仍為百家爭鳴的狀況，值得國內產學研進一步的投入以掌握關鍵性技術。在異質整合可撓性電容式壓力感測技術中，主要的研發方向為電極材料與介電層材料為主，進一步可以簡述如下：

A. 電極材料：可撓性壓力感測元件所需要的電極需具有良好的適形 (conformable)、抗酸鹼能力、延展性、導電性與大面積製程特性，所以，有

別於傳統用於微機電技術的金屬電極材料(如：金、鋁或銅等)，導電聚合物及奈米材料成為相關電極材料發展的主要方向。舉例而言，石墨烯(graphene)、奈米碳管或金屬奈米線等，皆可以沉積於柔性基板上做為電極材料，或是以夾層(sandwiched)的作法，將相關奈米導電材料與高分子聚合物貼合成為電容式壓力感測元件的導電材料；而在導電聚合物上，較為常見的材料則為聚二氧乙基噻吩：聚苯乙烯磺酸複合物(PEDOT:PSS)，然而，此導電聚合物的導電性極易受到濕度及酸鹼的影響，故在應用時皆會與其他聚合物或奈米材料(如：奈米銀線或是奈米碳管等)進行混合來達到應用的需求。

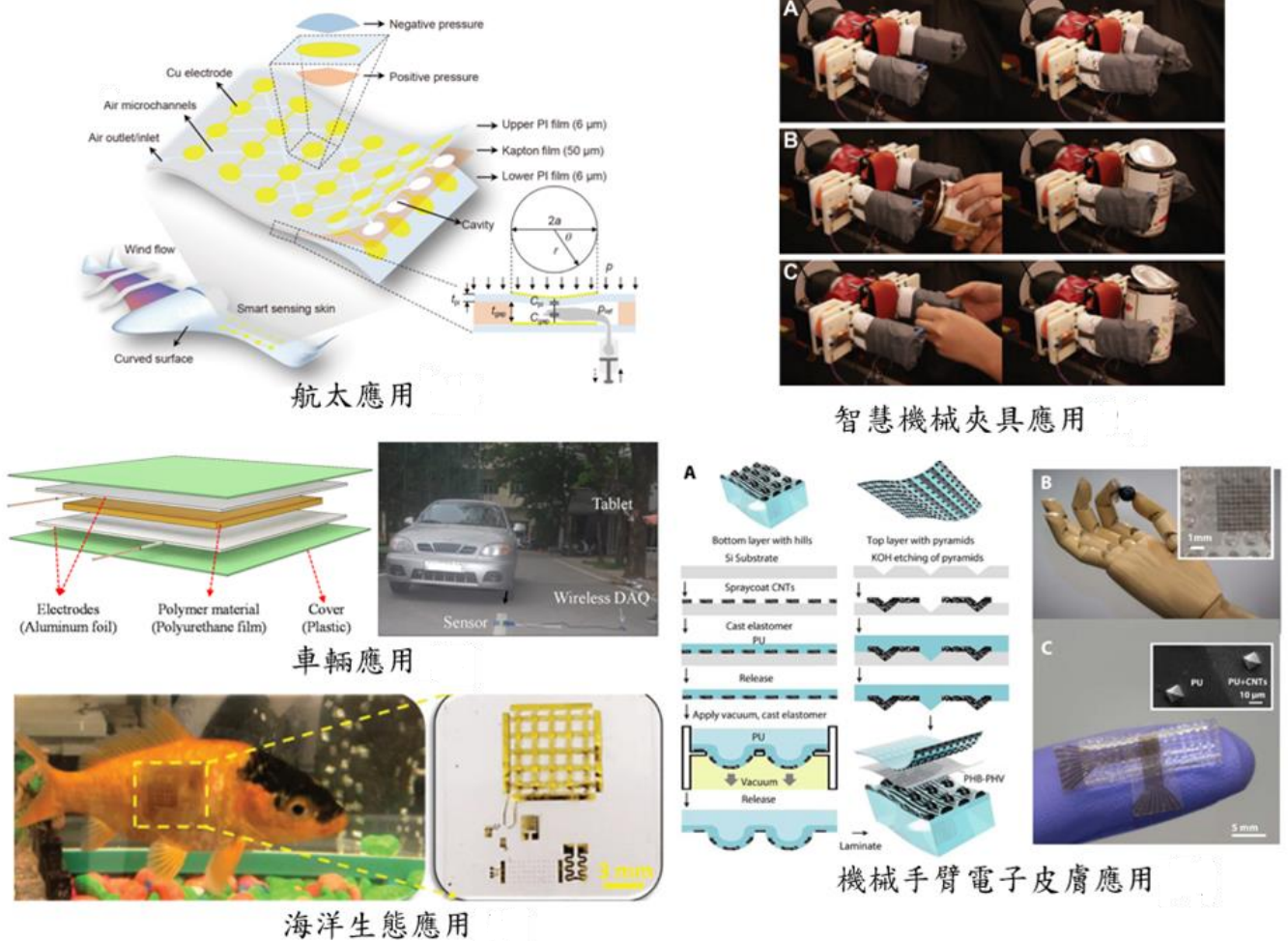
B. 介電層材料：在可撓性電容式壓力感測技術中，電極間的介電層材料為一重要的研發方向，因為其機械性質與介電性質將直接影響到電容式壓力感測元件的感測特性，如：靈敏性、遲滯效應、反應速度與溫度影響等。因此，不同的奈微米材料與聚合物材料被導入相關電容式壓力感測元件進行測試與驗證，舉例而言，有學者以石墨烯及氧化石墨烯(graphene oxide)分別做為導電層與介電層進行可撓性電容式壓力感測技術的研發，其利用印刷的製程方式將氧化石墨烯與還原氧化石墨烯(reduced graphene oxide)整合於聚對酞酸乙二酯(PET)基材之上做為電容式壓力感測材料；亦有學者以多孔隙聚合物材料，如 Ecolflex 或聚二甲基矽氧烷(PDMS)做為介電材料進行可撓性電容式壓力感測技術的研發，其利用多孔隙聚合物材料做為介電層，於介電層上以奈米碳管做為電極形成電容式感測架構，於人體胸腔上進行無線式呼吸監測的示範應用；此外，有學者利用微機電製程技術進行微柱體結構聚合物製作，以其作為電容式感測元件之介電層材料，此一技術具有提升感測靈敏性與感測層可撓性的優點，如圖 2.5.22 所示，亦可利用電極的設計來進行近接式量測(proximity sensing)。



資料來源：Nano Res. (2023)

圖 2.5.22 利用微柱體結構聚合物作為電容式感測元件介電層材料研究

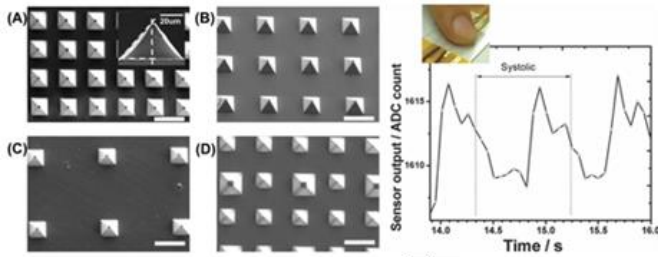
可撓性電容式微機電壓力感測元件在歷經約十年於製程及材料技術上的基礎研究之後，近年來開始有應用型的研究發表於學術期刊，如圖 2.5.23 所示。這些研究廣泛地針對不同的應用類型，如以航太的應用為例，Xiong 等學者利用聚醯亞胺(polyimide)及聚二甲基矽氧烷(PDMS)製作出可撓性電容式壓力感測元件來進行智慧無人機的空氣動力分析；以車輛的應用為例，Duc 等學者利用鋁為電極及聚氨酯(polyurethane)為介電材料，直接塗佈於道路之上做為無線式車輛壓力感測系統，監測車輛速度與載重；以海洋生態的應用為例，Shaikh 等學者利用鈦/金為電極金屬及聚二甲基矽氧烷為介電材料，製作可以貼附於海洋生物表面，進行海洋生態環境的監測；以機器人應用為例，Chin 等學者以可撓性電容式壓力感測元件製作貼附於機械夾具上，進行不同軟性材料，如紙張或塑膠容器等的感測與夾取；另外，Boutry 等學者以奈米碳管(CNT)與聚氨酯(PU)製作可貼附於機械手臂上的可撓性電容式壓力感測元件，用來控制機械手臂之移動。



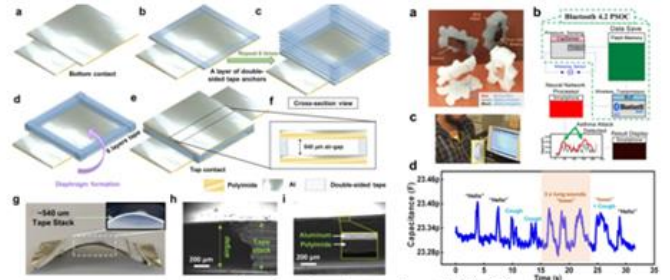
資料來源：Sci. China Technol. Sci. 2020, 63, 2073-2081, Polymers 2019, 11, 1247, Small 2019, 1804385, 2nd IEEE Int. Conf. Robot. Autom. 2019, 102-107, Sci. Robot. 2018, 3, eaau6914

圖 2.5.23 可撓性電容式微機電壓力感測元件於不同領域的應用範例

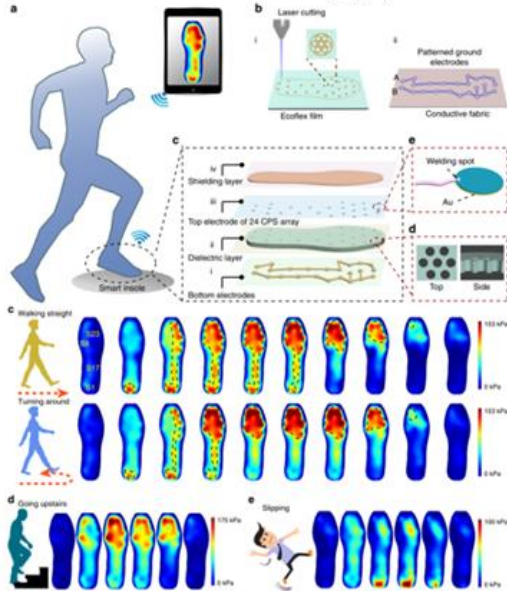
以健康照護應用為例，如圖 2.5.24 所示，Tee 等學者利用微金字塔結構做為介電層結構進行脈搏的量測，並展示可利用手指量測血管的收縮壓；Khan 等學者設計以金屬做為電極之薄膜可撓性壓力感測器做為氣喘的監測使用，並展示實際的呼吸監測與發音所量測到的壓力感測；Tao 等學者利用 Ecoflex 做為介電層，導電纖維做為電極組成可撓式壓力感測元件整合進鞋子內進行足底壓力的監測，成功地展示可以進行不同姿態的檢測；Lee 等學者則利用杜邦公司所發展的克維拉纖維(Kevlar fabric)做為介電材料層製作 6x6 電容式壓力感測陣列，以此來判斷手勢姿態並進一步控制無人機的飛行。



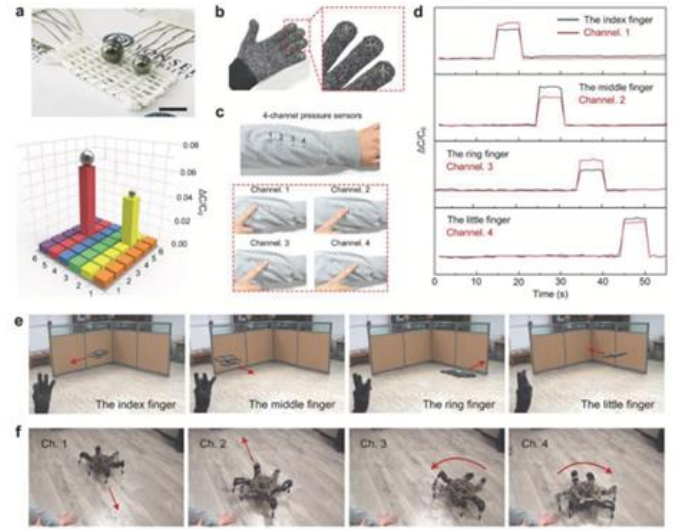
脈搏量測的應用



氣喘監測的應用



行走姿勢的應用



無人機飛行的應用

資料來源：Microsyst. Nanoeng. (2020)

圖 2.5.24 可撓性電容式壓力感測器於生理量測上之應用

參考文獻

- Panahandeh et al., (2015). Planar-Based Visual Inertial Navigation: Observability Analysis and Motion Estimation.
- Sharma S., Zapatero-Rodríguez J., Estrela P., O'Kennedy R. (2015) Point-of-Care Diagnostics in Low Resource Settings: Present Status and Future Role of Microfluidics. *Biosensors* 5, no. 3: 577-601. DOI: 10.3390/bios5030577
- Khosla, N. K., Lesinski, J. M., Colombo M., Bezinge L., deMello A. J., Richards D. A. (2022) Simplifying the complex: accessible microfluidic solutions for contemporary processes within in vitro diagnostics. *Lab Chip*. 2022 Sep 13;22(18):3340-3360. DOI: 10.1039/d2lc00609j.
- Lei, K. F. (2012) Microfluidic systems for diagnostic applications: a review. *J Lab Autom*. 2012 Oct;17(5): 330-47. DOI: 10.1177/2211068212454853.
- Liu, D., Wang, Y., Li, X., Li, M., Wu, Q., Song, Y., Zhu, Z., Yang, C. (2022) Integrated microfluidic devices for in vitro diagnostics at point of care. *Aggregate* 3(5), e184. DOI: 10.1002/agt2.184.
- Wang, K., Man, K., Liu, J., Liu, Y., Chen, Q., Zhou, Y., Yang Y. (2020) *ACS Biomater Sci Eng*. 6(6): 3231–3257. doi:10.1021/acsbiomaterials.9b01667.
- Wikswa J. P. (2014) The relevance and potential roles of microphysiological systems in biology and medicine. *Experimental Biology and Medicine*. 239(9), 1061-1072. DOI:10.1177/1535370214542068.
- Singh, R., Bathaei, M. J., Istif, E., Beker, L. (2020) *Adv Healthc Mater* 9(18), e2000790. DOI: 10.1002/adhm.202000790.
- Gao, F., Liu, C., Zhang, L., Liu, T., Wang, Z., Song, Z., Cai, H., Fang, Z., Chen, J. Wang, J., Han, M., Wang, J., Lin, K., Wang, R., Li, M., Mei, Q., Ma, X., Liang, S., Gou, G., Xue, N. (2023) Wearable and flexible electrochemical sensors for sweat analysis: a review. *Microsyst Nanoeng*. 2023 Jan 1; 9:1. DOI: 10.1038/s41378-022-00443-6.
- Yeo, J. C., Yu, J., Koh, Z. M., Wang, Z., Lim, C. T., (2016) Wearable tactile sensor based on flexible microfluidics. *Lab Chip* 16(17): 3244-50. DOI: 10.1039/c6lc00579a.
- Rawas-Qalaji, M., Cagliani, R., Al-Hashimi, N., Al-Dabbagh, R., Al-Dabbagh, A., Hussain, Z. (2023) Microfluidics in drug delivery: review of methods and applications. *Pharm Dev Technol*. 28(1): 61-77. doi: 10.1080/10837450.2022.2162543.

Check Hayden, E. (2014) Technology: The \$1,000 genome. *Nature* 507, 294–295 DOI: 10.1038/507294a.

Furlani, B., Kouter, K., Rozman, D., Paska, A. V. (2021) Sequencing of Nucleic Acids: from the First Human Genome to Next Generation Sequencing in COVID-19 Pandemic. *Acta Chim. Slov.* 68, 268–278. DOI: 10.17344/acsi.2021.6691.

Illumina, Novaseq x series brochure.

Illumine Knowledge, Best practices for preparing and inspecting NovaSeq 6000 flow cells for sequencing.

Illumina, Single-Cell Sequencing Workflow: CriticalSteps and Considerations.

Tangle, D. A., The NIH microphysiological systems program: developing in vitro tools for safety and efficacy in drug development. *Curr Opin Pharmacol* 48:146-154. DOI: 10.1016/j.coph.2019.09.007.

Seyhan A. A. (2019) Lost in translation: the valley of death across preclinical and clinical divide –identification of problems and overcoming obstacles. *Translational Medicine Communications*, 4:18. DOI: 10.1186/s41231-019-0050-73.

Si, L., Bai, H., Rodas, M., et al., (2021) A human-airway-on-a-chip for the rapid identification of candidate antiviral therapeutics and prophylactics. *Nat Biomed Eng* 5(8), 815-829. DOI: 10.1038/s41551-021-00718-9.

Brownell, L (2021) Human organ chips enable rapid drug repurposing for COVID-19. *The Harvard Gazette*.

Huh, D., Matthews, B. D., Mammoto, A., Montoya-Zavala, M., Hsin, H. U., Ingber, D. E. (2010) Reconstituting organ-level lung functions on a chip. *Science* 328(5986):1662-8. DOI 10.1126/science.1188302.

Badrinath Jagannath 1, Kai-Chun Lin 1, Madhavi Pali 1, Devangsingh Sankhala 2, Sriram Muthukumar 3, Shalini Prasad 1 (2021) Temporal profiling of cytokines in passively expressed sweat for detection of infection using wearable device. *Bioeng Transl Med* 6(3): e10220. DOI: 10.1002/btm2.10220.

Shahub, S., Lin, K., Muthukumar, S. Prasad, S. A Proof-of-Concept Electrochemical Skin Sensor for Simultaneous Measurement of Glial Fibrillary Acidic Protein (GFAP) and Interleukin-6 (IL-6) for management of Traumatic Brain Injuries. *Biosensors*. 12, 1095. DOI: 10.3390/bios12121095.

Zeng, F.-G. (2022). Celebrating the one millionth cochlear implant. *JASA Express Lett.* 2. DOI: 10.1121/10.0012825

Zeng, F. G., Rebscher, S., Harrison, W., Sun, X., and Feng, H. H. (2008). Cochlear implants: System design, integration and evaluation. *IEEE Rev. Biomed. Eng.* 1. DOI: 10.1109/RBME.2008.2008250

Johnson, A. C., Wise, K. D. (2014) An active thin-film cochlear electrode array with monolithic backing and curl. *J. Microelectromech. Syst.* 23. DOI: 10.1109/JMEMS.2013.2288947

Hughes, A. J., Daniel, S. E., Kilford, L., and Lees, A. J. (1992). Accuracy of clinical diagnosis of idiopathic Parkinson's disease: a clinico-pathological study of 100 cases. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry* 55, 181–184. DOI: 10.1136/jnnp.55.3.181.

Postuma, R. B., Berg, D., Stern, M., Poewe, W., Olanow, C. W., Oertel, W., et al. (2015). MDS clinical diagnostic criteria for Parkinson's disease. *Mov. Disord.* 30, 1591–1601. DOI: 10.1002/mds.26424

Collaborators, G. U. N. D., Feigin, V. L., Vos, T., Alahdab, F., Amit, A. M. L., Barnighausen, T. W., et al. (2020). Burden of neurological disorders across the US from 1990-2017: a global burden of disease study. *JAMA Neurol.* 78, 165–176.

Yang, W., Hamilton, J. L., Kopil, C., Beck, J. C., Tanner, C. M., Albin, R. L., et al. (2020). Current and projected future economic burden of Parkinson's disease in the U.S. *NPJ Parkinsons Dis.* 6:15. DOI: 10.1038/s41531-020-0117-1

National Collaborating Centre for Chronic Conditions (2006). *Parkinson's Disease National Clinical Guideline for Diagnosis and Management in Primary and Secondary Care*. London: National Institute for Health and Clinical Excellence.

Pahwa, R., Factor, S. A., Lyons, K. E., Ondo, W. G., Gronseth, G., Bronte-Stewart, H., et al. (2006). Practice parameter: treatment of Parkinson disease with motor fluctuations and dyskinesia (an evidence-based review): report of the quality standards subcommittee of the American academy of neurology. *Neurology* 66, 983–995. DOI: 10.1212/01.wnl.0000215250.82576.87

Fox, S. H., Katzenschlager, R., Lim, S. Y., Ravina, B., Seppi, K., Coelho, M., et al. (2011). The movement disorder society evidence-based medicine review update: treatments for the motor symptoms of parkinson's disease. *Mov. Disord.* 26(Suppl. 3), S2–S41. DOI: 10.1002/mds.23829

Ferreira, J. J., Katzenschlager, R., Bloem, B. R., Bonuccelli, U., Burn, D., Deuschl, G., et al. (2013). Summary of the recommendations of the EFNS/MDS-ES review on therapeutic management of Parkinson's disease. *Eur. J. Neurol.* 20,

5–15. DOI: 10.1111/j.1468-1331.2012.03866.x

Wårdell, K., Nordin, T., Vogel, D., Zsigmond, P., Westin, C.-F., Hariz, M., Hemm, S. (2022). Deep brain stimulation: Emerging tools for simulation, data analysis, and visualization. *Front. Neurosci.* 16. DOI: 10.3389/fnins.2022.834026

Hitti, F. L., Ramayya, A. G., McShane, B. J., Yang, A. I., Vaughan, K. A. (2019). Long-term outcomes following deep brain stimulation for Parkinson's disease. *J Neurosurg.* 1-6. DOI: 10.3171/2018.8.JNS182081.

Vedam-Mai, V., Deisseroth, K., Giordano, J., Lazaro-Munoz, G., Chiong, W., Suthana, N., Langevin, J. P., Gill, J., Goodman, W., Provenza, N. R., Halpern, C. H., Shivacharan, R. S., Cunningham, T. N., Sheth, S. A., Pouratian, N., Scangos, K. W., Mayberg, H. S., Horn, A., Johnson, K. A., Butson, C. R., Gilron, R., de Hemptinne, C., Wilt, R., Yaroshinsky, M., Little, S., Starr, P., Worrell, G., Shirvalkar, P., Chang, E., Volkmann, J., Muthuraman, M., Groppa, S., Kuhn, A. A., Li, L., Johnson, M., Otto, K. J., Raike, R., Goetz, S., Wu, C., Silburn, P., Cheeran, B., Pathak, Y. J., Malekmohammadi, M., Gunduz, A., Wong, J. K., Cerner, S., Hu, W., Wagle Shukla, A., Ramirez-Zamora, A., Deeb, W., Patterson, A., Foote, K. D., and Okun, M. S. (2021). "Proceedings of the Eighth Annual Deep Brain Stimulation Think Tank: Advances in Optogenetics, Ethical Issues Affecting DBS Research, Neuromodulatory Approaches for Depression, Adaptive Neurostimulation, and Emerging DBS Technologies," *Front. Hum. Neurosci.* 15, 644593.

Kestenbaum, M., Ford, B., Louis, E. D. (2015). Estimating the proportion of Essential Tremor and Parkinson's Disease patients undergoing deep brain stimulation surgery: Five-year data from Columbia University Medical Center (2009–2014). *Mov. Disord. Clin. Pract.* 2(4). DOI: 10.1002/mdc3.12185

Mahajan, A., Butala, A., Okun, M. S., Mari, Z., Mills, K. A. (2021). Global variability in deep brain stimulation practices for Parkinson's disease. *Front. Hum. Neurosci.* 15. DOI: 10.3389/fnhum.2021.667035

Sdrulla, A. D., Guan, Y., Raja, S. N. (2018). Spinal cord stimulation: clinical efficacy and potential mechanisms. *Pain Pract.* 18-8. DOI: 10.1111/papr.12692

Melzack R, Wall P. D. (1965). Pain mechanisms: a new theory. *Sci.* 150. DOI: 10.1126/science.150.3699.971

Smits, H., van Kleef, M., Holsheimer, J., Joosten, E. A. (2013). Experimental spinal cord stimulation and neuropathic pain: mechanism of action, technical aspects, and effectiveness. *Pain Pract.* 13. DOI: 10.1111/j.1533-2500.2012.00579.x

De Ridder, D., Vanneste, S., Plazier, M., van der Loo, E., Menovsky, T. (2010). Burst spinal cord stimulation: toward paresthesia-free pain suppression. *Neurosurg.* 66. DOI: 10.1227/01.NEU.0000368153.44883.B3

van Hecke, O., Austin, S. K., Khan R. A., Smith, B. H., Torrance, N. (2014) Neuropathic pain in the general population: a systematic review of epidemiological studies. *Pain.* 155. DOI: 10.1016/j.pain.2013.11.013

Thomson, S. (2013). Failed back surgery syndrome - definition, epidemiology and demographics. *Br J Pain.* 7(1). DOI: 10.1177/2049463713479096.

Grider, J. S., Manchikanti, L., Carayannopoulos, A., Sharma, M. L., Balog, C. C., Harned, M. E., Grami, V., Justiz, R., Nouri, K. H., Hayek, S. M., Vallejo, R., Christo, P. J. (2016). Effectiveness of spinal cord stimulation in chronic spinal pain: A systematic review. *Pain Physician.* 19(1). PMID: 26752493.

Linderoth, B., Foreman, R. D. (2017) Conventional and novel spinal stimulation algorithms: hypothetical mechanisms of action and comments on outcomes. *Neuromodulation.* 20. DOI: 10.1111/ner.12624

De Wachter, S., Knowles, C. H., Elterman, D. S., Kennelly, M. J., Lehur, P. A., Matzel, K. E., Engelberg, S., and Van Kerrebroeck, P. E. V. (2020). New technologies and applications in sacral neuromodulation: An update. *Adv. Ther.* 37. DOI: 10.1007/s12325-019-01205-z

Lozano, A. M., Lipsman, N., Bergman, H., Brown, P., Chabardes, S., Chang, J. W., Matthews, K., McIntyre, C. C., Schlaepfer, T. E., Schulder, M., Temel, Y., Volkmann, J., Krauss, J. K. (2019). Deep brain stimulation: current challenges and future directions. *Nat Rev Neurol* 15. DOI: 10.1038/s41582-018-0128-2

“Chemical Sensor Market,” Precedence Research, referred 8/30/2023, (<https://www.precedenceresearch.com/chemical-sensors-market>)

R. Feynman (1992), “There’s plenty of room at the bottom,” *J. Microelectromech Syst.*, 1, 60-66.

D. Stanglin, “Global pollution is the world’s biggest killer and a threat to survival of mankind, study finds,” *USA Today*, Oct. 21, 2017. (<https://www.usatoday.com/story/news/2017/10/20/study-global-pollution-worlds-biggest-killer-and-threat-survival-mankind/783321001/>)

H. R. Shwetha, et al. (2022), “MEMS based metal oxide semiconductor carbon dioxide gas sensor,” *Micro & Nano Eng.*, 16, 100156.

Y.-J. Hsiao, et al. (2022), “Double-layered NiO/SnO₂ sensor for improved SO₂ gas sensing with MEMS microheater device,” *ECS J. Solid State Sci. Technol.*,

11, 057002.

Hsueh and Wu (2021), "Highly sensitive Co_3O_4 nanoparticles/MEMS NO_2 gas sensor with the adsorption of the Au nanoparticles," *Sens. Actuator B: Chem.*, 329, 129201.

A. Dey (2018), "Semiconductor metal oxide gas sensors: A review," *Mater. Sci. & Eng. B: Solid State Mater. Adv. Technol.*, 229, 206-217.

W.-Y. Chuang, et al. (2019), "A low-power PDOT: PSS/EB-PANI for CO_2 sensing material integrated with a self-powered sensing platform," *IEEE Sens. J.*, 20, 55-61.

Y.-M. Jo, et al. (2022), "MOF-based chemiresistive gas sensors: toward new functionalities," *Adv. Mater.*, e2206842.

F. Zhang, et al. (2022), "A flexible and wearable NO_2 gas detection and early warning device based on a spraying process and an interdigital electrode at room temperature," *Microsyst. Nanoeng.*, 8, 40.

T. He, et al. (2023), "Emerging wearable chemical sensors enabling advanced integrated systems toward personalized and preventive medicine," *Anal. Chem.*, 95, 490-514.

A. Bayram, et al. (2017), "CO gas sorption properties of ferrocene branched chitosan derivatives," *Sens. Actuators B, Chem.*, 241, 308-313.

I. Constantinoiu and C. Viespe (2020), "ZnO metal oxide semiconductor in surface acoustic wave sensor: a review," *Sensors*, 20, 5118.

A. Palla-Papavlu, et al. (2021), "Sensitive materials and coating technologies for surface acoustic wave sensors," *Chemosensors*, 9, 105.

H. Li, et al. (2019), "Surface acoustic wave NO_2 sensors utilizing colloidal SnS quantum dot thin films," *Surf. Coatings Technol.*, 362, 78-83.

B. Paschke, et al. (2017), "Fast surface acoustic wave-based sensors to investigate the kinetics of gas uptake in ultra-microporous frameworks," *ACS Sensors*, 2, 740-747.

Z. Wang, et al. (2022), "Metal-organic framework-based photonic crystal platforms for gas sensing: a review," *Mater. Adv.*, 3, 6728-6741.

J. Li, et al. (2021), "Structure design and application of hollow core microstructured optical fiber gas sensor: A review," *Optics & Laser Technol.*, 135, 106658.

M.-Q. Chen, et al. (2021), "3D printed castle style Fabry-Perot microcavity on

optical fiber tip as a highly sensitive humidity sensor,” *Sens. Actuators B, Chem.*, 328, 128981.

A. Chauhan, et al. (2021), “Evanescent wave cavity ring-down spectroscopy based interfacial sensing of prostate-specific antigen, *Sens. Actuators B, Chem.*, 330, 120294.

J. Qin, et al. (2022), “Metasurface micro/nano-optical sensors: principles and applications,” *ACS Nano*, 16, 11598-11618

S. S. B. Hashwan, et al. (2023), “A review of piezoelectric MEMS sensors and actuators for gas detection application,” *Discover Nano*, 18, 25.

Y. Duan, et al. (2016), “Wireless gas sensing based on a passive piezoelectric resonant sensor array through near-field induction,” *Appl. Phys. Lett.*, 109, 263503.

R. Hoffmann, et al. (2017), “The concept of thin film bulk acoustic resonators as selective CO₂ gas sensors,” *J. Sens. Sens. Syst.*, 6, 87-96.

L. Zhou, et al. (2022), “Enhanced NO₂ sensitivity of SnO₂ SAW gas sensors by facet engineering,” *Sens. Actuators B Chem.*, 361, 131735.

M. M. Shulaker, et al. (2017), “Three-dimensional integration of nanotechnologies for computing and data storage on a single chip,” *Nature*, 547, 74-78.

M. Guo, et al. (2022), “Challenges and opportunities of chemiresistors based on microelectromechanical systems for chemical olfaction,” *ACS Nano*, 16, 17778-17801.

“MEMS pressure sensors market size & share analysis growth trends & forecasts (2023-2028)” Mordor Intelligence, referred 9/15/2023, (<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/mems-pressure-sensors-market>)

“MEMS pressure sensors – technology and market trends 2021,” Yole Development 2021.

O. Tabata, et al. (1989), “Mechanical property measurements of thin films using load-deflection of composite rectangular membranes,” *Sens. Actuators*, 20, 135-141.

Y. Seo, et al. (2019), “Piezoelectric pressure sensors for hypersonic flow measurements,” *J. Microelectromech. Syst.*, 28, 271-278.

- S.-E. Zhu, et al. (2013), “Graphene based piezoresistive pressure sensor,” *Appl. Phys. Lett.*, 102, 161904.
- M. Narducci, et al. (2013), “CMOS MEMS capacitive absolute pressure sensor,” *J. Micromech. Microeng.*, 23, 055007.
- D. C. Abeysinghe, et al. (2001), “A novel MEMS pressure sensor fabricated on an optical fiber,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 13, 993-995.
- L. S. Chin, et al., “Intracranial pressure (ICP) monitors,” *Medscape*, referred 9/15/2023, <https://emedicine.medscape.com/article/1983045-overview>.
- A. Ristic, et al. (2015), “Current neuromonitoring techniques in critical care,” *J. Neuroanaesth. Crit. Care*, 2, 97-103.
- K. Takei, et al. (2010), “Nanowire active-matrix circuitry for low-voltage macroscale artificial skin,” *Nat. Mater.*, 9, 821-826.
- S. Bauer, et al. (2014), “A soft future: from robots and sensor skin to energy harvesters,” *Adv. Mater.*, 26, 149-162.
- I. S. Bayer (2022), “MEMS-based tactile sensors: materials, processes and applications in robotics,” *Micromachines*, 13, 2051.
- S. Wan, et al. (2017), “Graphene oxide as high-performance dielectric materials for capacitive pressure sensor,” *Carbon*, 114, 209-216.
- A. del Bosque, et al. (2023), “Highly flexible strain sensors based on CNT-reinforced Ecoflex silicone rubber for wireless facemask breathing monitoring via Bluetooth,” *ACS Appl. Poly. Mater.*, in press, DOI: 10.1021/acsapm.3c01689.
- Y. Luo, et al. (2023), “A flexible dual-function capacitive sensor enhanced by loop-patterned fibrous electrode and doped dielectric pillars for spatial perception,” *Nano Res.*, 16, 7750-7558.
- W.N. Xiong, et al. (2020), “Conformable, programmable and step-linear sensor array for large-range wind pressure measurement on curved surface,” *Sci. China Technol. Sci.*, 63, 2073-2081.
- C. K. Duc, et al. (2019), “A low-cost, flexible pressure capacitor sensor using polyurethane for wireless vehicle detection,” *Polymers*, 11, 1247.
- S. F. Shaikh, et al. (2019), “Noninvasive featherlight wearable compliant “marine skin”: standalone multisensory system for deep-sea environmental monitoring,” *Small*, 1804385.
- L. Chin, et al. (2019), “Automated recycling separation enabled by soft robotic material classification,” 2nd IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 102-107.

C. M. Boutry, et al. (2018), “A hierarchically patterned, bioinspired e-skin able to detect the direction of applied pressure for robotics,” *Sci. Robot.*, 3, eaau6914.

B. C.-K. Tee, et al. (2014), “Tunable flexible pressure sensors using microstructured elastomer geometries for intuitive electronics,” *Adv. Funct. Mater.*, 24, 5247-5434.

S. M. Khan, et al. (2020), “Design analysis and human tests of foil-based wheezing monitoring system for asthma detection,” *IEEE Trans. Electron Devices*, 67, 249-257.

J. Tao, et al (2020)., “Real-time pressure mapping smart insole system based on a controllable vertical pore dielectric layer,” *Microsyst. Nanoeng.*, 6, 62.

J. Lee, et al. (2015), “Conductive fiber-based ultrasensitive textile pressure sensor for wearable electronics,” *Adv. Mater.*, 2433-2439.

<https://www.neurosurgery.pitt.edu>

<https://www.medtronic.com>

<https://www.abbott.com>

<https://www.bostonscientific.com>

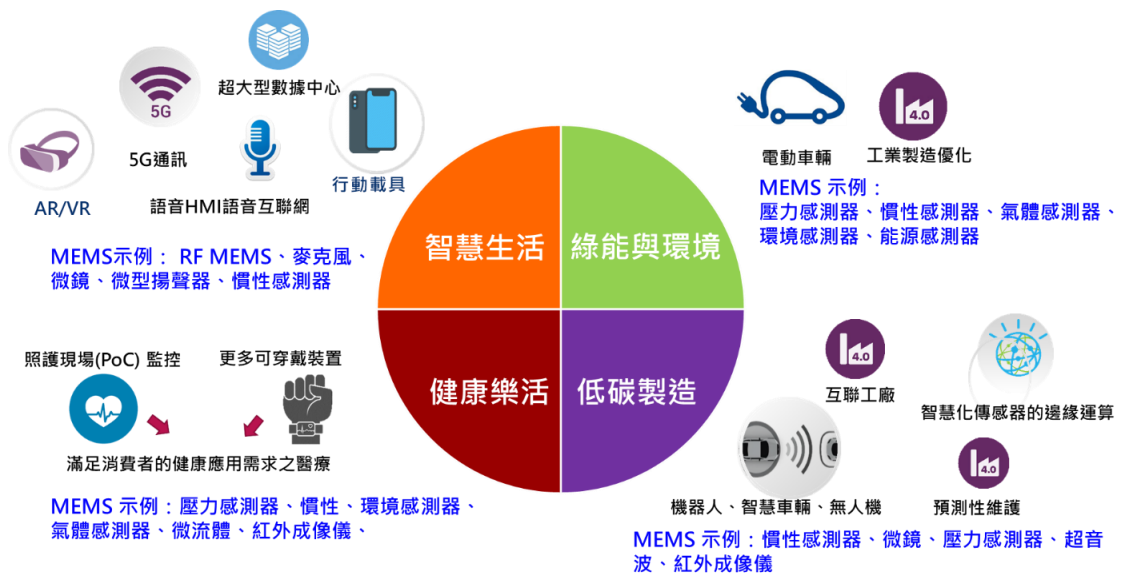
<https://www.aans.org>

第三章 微機電產業及其應用市場之拓展

MEMS 技術所支援之兩大應用，感測器和致動器應用遍佈於各類產品。終端產品應用上，已經從大眾日常生活所使用的智慧型手機、平板電腦擴展到汽車先進技術之自動駕駛、醫療檢測、智慧製造之工業感測以及更前瞻之航空航太的各種感應系統。總體而言，MEMS 產品包含消費性、醫療、通訊、工業、汽車與太空各領域之終端產品和整合性產品組合，未來五年之全球市場有機會突破 220 億美元，成長動能主要來自消費性、汽車和工業之人工智慧物聯網(AIoT)與終端應用。

一、應用需求

MEMS 技術之應用，涵蓋當今與未來大趨勢，包含智慧生活、健康樂活、能源與環境、低碳製造四大領域，分類如下圖 3.1 所示，包含傳統應用與新興應用，並說明如後：



資料來源：工研院 (2023)

圖 3.1 MEMS 技術應用大趨勢

(一)傳統應用

1. RF MEMS 元件

由於 5G 通訊產業逐步落實且市場不斷擴大，更多具有 5G 功能的智慧型手機出現以及需要更多連接的基站，以維持通訊順暢，因此用於解決 5G 頻率(3GHz 以上)的相關 BAW (Bulk Acoustic Wave，體聲波)/FBAR (Film Bulk Acoustic Resonator，薄膜腔聲波諧振器)/XBAR (Laterally-excited Bulk Acoustic Resonators，橫向激勵體聲諧振器)濾波器以 SAW (Surface

Acoustic Wave，聲表面波)等需求增加，帶動 RF-MEMS 元件需求居高不下。甚至有新業者投入，特別是中國企業如 Sappland、EpicMEMS、MEMSonics 等，在其境內進行大量投資。

2. 無線藍芽耳機和麥克風 (TWS，True Wireless Stereo)

受到語音與多媒體產品之多元性和個人化訴求提升，以及使用者對於主動降噪(Active Noise Cancelling)、語音拾取和活動檢測等的迫切需求，如真無線藍芽耳機(True Wireless Stereo Headphones)，隨著汽車多媒體和免提語音控制以及助聽器應用增加，提升更多的無線藍芽耳機和麥克風之需求。

3. 慣性感測器

慣性感測器在可穿戴產品/語音設備和相關應用有很高之整合度(例如用於自動感應回饋的加速度計、用於語音辨識的語音加速度計、用於 3D 音效的慣性測量)以及 ADAS (Advanced Driver Assistance Systems，先進駕駛輔助系統)/汽車電氣化中即時回饋，提高安全性和導航/定位、和其他安全偵測功能以及自適應巡航控制中的偵測。而工業應用可擴及機械設備運作與健康診斷、馬達/主軸/刀座等零組件運作加工狀態判斷的振動頻譜分析，甚至衍生至橋樑、邊坡等結構異常監測，使慣性感測器發展活絡。

4. 光學 MEMS 組件

隨著當前之汽車行業安全性的重視，遠距溝通之虛擬實境情境需求，ADAS/MR (Mixed Reality，混合實境)已經形成光學技術之發展趨勢，因此用於 ADAS/自動駕駛(LiDAR (Light Detection And Ranging，光學雷達)、HUD (Head-up Display，抬頭顯示器)、數位投影和 AR (Augmented Reality，擴增實境)/VR (Virtual Reality，虛擬實境) (MEMS 的投影模組，如 LBS (Laser-Beam Scanning，雷射光束掃描))領域的發展正在加速，如帶動數位光學投影機、頭戴式裝置等之市場需求。

5. MEMS 微流體

在 COVID-19 疫情期間，矽微流體在臨床和即時診斷中，用來作為呼吸道病原體檢測的需求顯著提升。帶動產業對製藥和生命科學研究領域之關注，尤其是防疫或 DNA 測序之需求將帶動 MEMS 微流體產品市場發展。

(二)新興應用

1. 超音波 MEMS

受惠於開發成本較低，MEMS 超音波應用越來越受歡迎，常見之應用為醫學成像(cMUT (Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer，電容式微機械超音波換能器) 和 PMUT (Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducer，壓電微機械超音波換能器)之微系統元件)、觸覺、氣體和環境感測器，也可以代替消費性產品之機械性按鈕，使無須碰觸也能有靈敏之感測訊號，因此也能應用於如自駕車、高階無人載具、機器人設備等之定位。

2. 微型揚聲器

MEMS 揚聲器是一種使用微機電技術來產生音訊的裝置，以半導體製程製作微機械結構，該音訊裝置中的微機械結構操作範圍在微米尺度內，其優勢在於具空間音效功能、卓越的音訊透明度和高傳真度，適用於物聯網、穿戴式設備、Speaker(揚聲器)等，促成大量提升市占率的機會。

3. 新能源應用微型感測器

在新能源技術發展下(包含離岸風電，氫能，地熱等)，如離岸風機對於其機電設備所需要的運轉狀態監控(包含電力設備，動力機構等)，海底下的結構與電力傳輸等，皆需要具高可靠度的微型化 MEMS 感測器，協助其達到數位化 IoT (Internet of Things，物聯網)，或是在氫能運輸與儲存階段，需要即時的微型化感測技術，達到預防洩漏目標。因此，未來在新能源技術的發展下，對於設備與基礎設施的可靠度與穩定性是未來 MEMS 感測器的潛力發展市場。

4. 氣體感測器

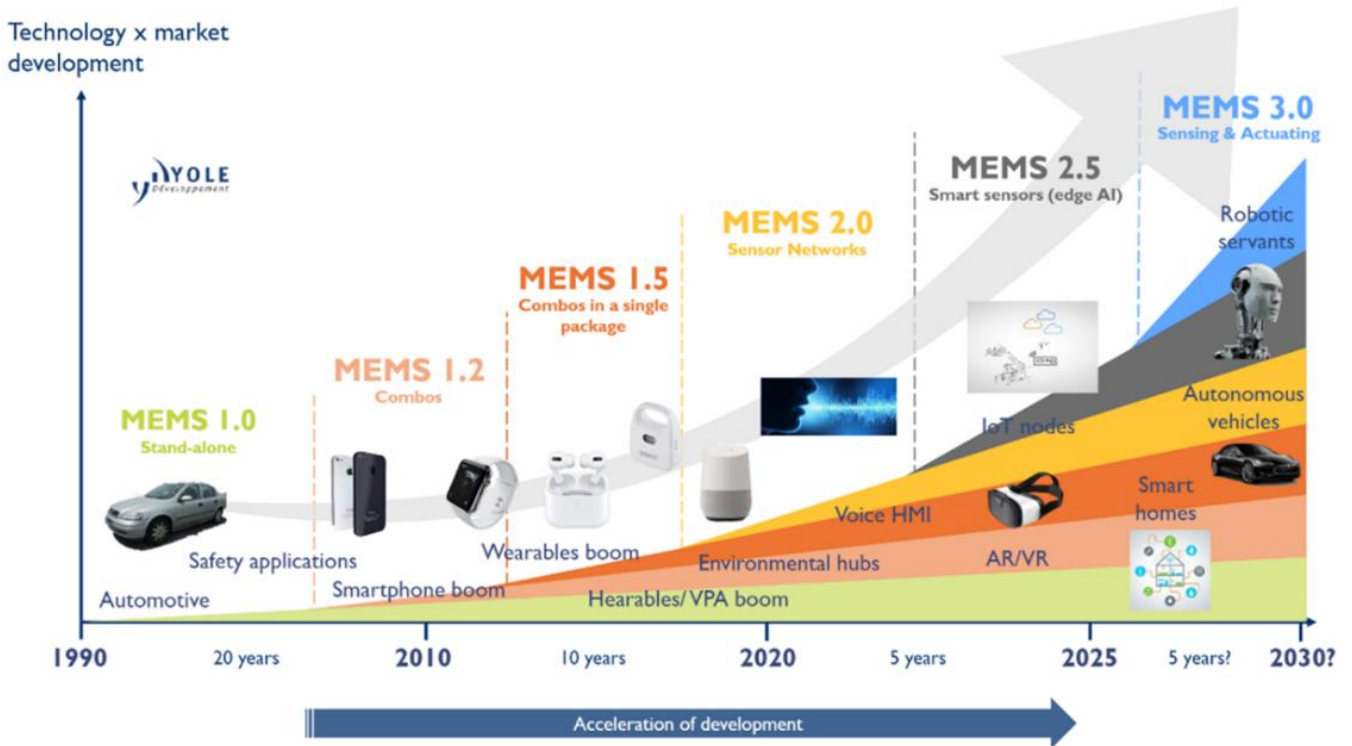
國際淨零碳排之倡議與環境日益嚴重有害氣體汙染，帶動人們對環境監控之重視，尤其氣體和環境組合之感測器 (H&T(Humidity & Temperature)、壓力、氣體) 整合到各種設備中(空氣淨化器、其他消費和商業設備)以監測室內和室外空氣品質將更加普遍。

二、技術整合

MEMS 本身定義為一個智慧型微小化的系統，包含感測、處理或致動的功能，此外為兩個或多個電子、機械、光學、化學、生物、磁學或其他性質整合到一個單一或多晶片上，本身既為多種理化技術整合的單元。

MEMS 元件的製造技術可以利用半導體 CMOS 製程技術為基礎，以異質整合封裝晶片模式，整合不同的晶片技術，延伸應用於不同訊號處理產品，如微機電揚聲器：移動不同揚升音頻的微型振膜結構驅動晶片、戶

外用 CO 氣體感測器：CO 氣體感測晶片結合溫濕校準功能的微處理器晶片、熱影像照相機：熱影像感測晶片結合影像數位訊號處理晶片、指紋辨識產品：觸覺感測晶片結合個人隱私保護的加密處理晶片、廣布型環境感測節點(Sensor Node)：溫濕壓感測晶片結合無線傳輸通訊傳輸晶片、臉部辨識產品：3D 感測晶片結合臉部特徵神經網路運算的 AI 加速運算晶片等。



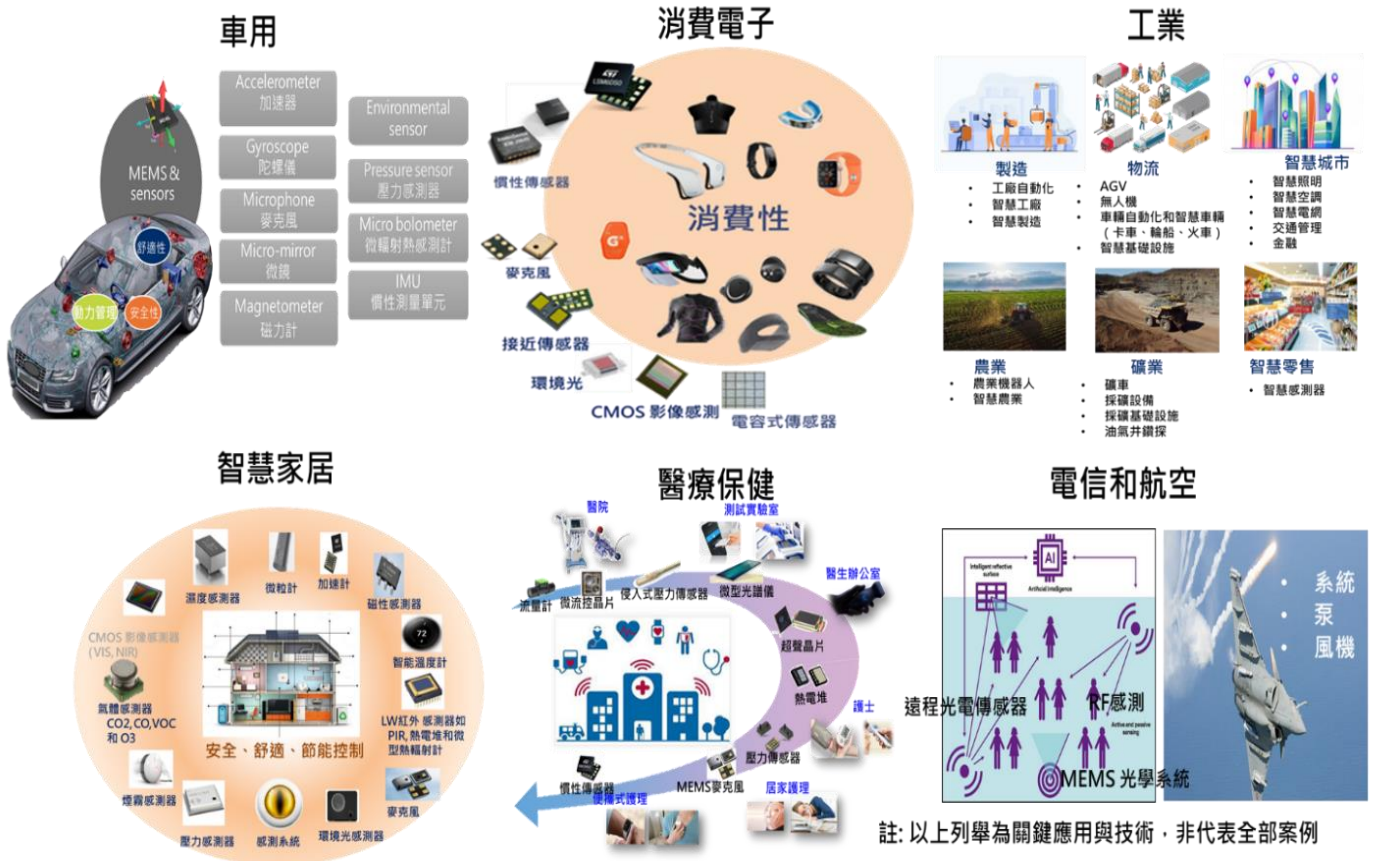
資料來源 Yole (2020)

圖 3.2 MEMS 感測器的技術與市場加速發展中

MEMS 藉由半導體製程微縮、整合(Integration)、以及批量製造等優點，驅使相關產品具有尺寸小、耗電少、價格低等諸多競爭優勢，也成為許多新興產業，如物聯網、智慧應用(Smart-X)、元宇宙、淨零碳排、綠色能源、國防航太的關鍵技術，應用範圍與需求數量急遽上升，依 Yole 預測的 MEMS 技術於 2023 已邁入 MEMS2.5 smart sensors (edge AI)，5 年內即將進入 MEMS3.0 sensing & actuating 之技術與市場，如圖 3.2 所示。由於機械結構的特性，MEMS 不需要跟隨摩爾定律的腳步，致力於縮小元件的尺寸；可藉由多樣化技術原理、晶片整合設計與系統應用的超越摩爾方式，來拓展半導體與 MEMS 製程的影響力和應用，因此具有重要的戰略價值，值得國內半導體及 MEMS 業者加以重視。

三、應用系統及終端產品

MEMS 特性不同，應用多元，市場已對終端市場做分類，包括汽車、消費電子、工業、醫療保健、電信和航空等各種垂直領域，如圖 3.3 所示。



資料來源：工研院 (2023)

圖 3.3 MEMS 技術之多元應用圖例

(一) 車用 (Automotive)

MEMS 感測器在汽車通訊娛樂和安全應用中發揮著關鍵作用。對於汽車領域，終端產品包括高級駕駛輔助(ADAS)、電子控制單元(ECU)、電子穩定控制(ESC)、車內溫度感測器、通風和空調系統(HVAC, heating, ventilation and air conditioning)、安全和安保、車載導航、光學圖像穩定(OIS)攝影鏡頭、胎壓監測系統(TPMS)、引擎管理系統、燃油噴射系統和外圍壓力感測器。

ADAS 系統的 MEMS 慣性感測器(加速度計和陀螺儀)可用於支持駕駛員輔助功能，例如側傾穩定性控制、自適應巡航控制和非主動阻尼系統。電子控制單元(ECU)用在管理和控制車輛內部系統；電子控制單元包括發

動機控制單元、速度控制單元、變速器控制單元、動力總成控制模組和電池管理系統。

電子穩定性控制(ESC)系統對於車輛的穩定性非常重要，可以保護車輛免受失控或打滑的危險。ESC 系統中包含的一些組件是防鎖死制動系統和牽引力控制系統，MEMS 加速度計、MEMS 陀螺儀和輪速感測器，在高階車輛之 ESC 系統已經普遍應用。還有屬於機械系統的暖氣、通風和空調(HVAC)系統，用於在室內提供舒適的空氣環境，而 MEMS 的壓力感測器和溫度感測器可用於汽車 HVAC 製冷系統。

(二) 消費性應用 (Consumers)

消費性主要用於包括可穿戴設備在內的電子設備；智慧型手機、平板電腦、筆記型電腦；可攜帶式導航設備；可攜帶式媒體播放器；數位相機和遊戲機；以及電子閱讀器。消費電子產品中一些最常用的 MEMS 包括加速度計、陀螺儀、磁羅盤、壓力感測器、溫度和濕度感測器、MEMS 麥克風、MEMS 微鏡、體聲波(BAW)濾波器和雙工器、RF 開關、TCXO (Temperature Compensated Crystal Oscillators, 溫度補償晶體振盪器)振盪器、環境光感測器和接近感測器、微型顯示器和磁力計。

穿戴式裝置中，智慧型手錶功能逐漸強大，多數已整合活動監視器和計步器，高階可穿戴設備可用作活動監視器、睡眠感測器和心率監視器，還可以優化運動表現、目標監控、體重控制、方向數據和位置共享。

在智慧型手機中的功能，透過加速度計、指南針和陀螺儀的組合來檢測位置和方向。利用氣壓計與其他工具結合使用，配合 GPS、Wi-Fi 和地標辨識來檢測大氣壓力。利用環境光感測器，在黑暗環境中調節亮度水平，以及指紋感測器，實現身份驗證。

可攜帶式導航設備，是一種內置加速度計、定位能力設備(例如 GPS)和提供導航功能的校準模組的電子設備，加速度計在該設備中被廣泛使用，該功能是根據從 GPS 的速度和航向數據計算出的校正參數來感測校正模組啟用的加速度。

MEMS 陀螺儀是滿足最新智慧手機攝影鏡頭要求的最佳解決方案，用於測量和控制角速度。例如，InvenSense (美國)開發可用於圖像穩定的陀螺儀，用於超薄智慧手機。雙軸 MEMS 陀螺儀 IDG-2000 適用於相機應用。與其他解決方案相比，MEMS 陀螺儀的抗雜訊更佳。

(三) 醫療保健應用 (Medical and Health)

分別以醫療應用及保健穿戴式裝置說明，在穿戴式裝置中，智慧型手錶功能逐漸強大，多數已整合活動監視器和計步器，高階可穿戴設備可用作活動監視器、睡眠感測器和心率監視器，還可以優化運動表現、目標監控、體重控制、方向數據和位置共享。

醫療應用主要有：(1)非侵入顯微應用的顯微內視鏡(鏡頭移動微型致動元件、偵測胃部狀況的無線藥丸(Radio pills)/膠囊內視鏡)，甚至擴充至結合機械手臂的微創手術與投藥治療；(2)人工臟器與組織(如微助聽器、視網膜復健的植入式神經電刺激器、手指觸覺復能微壓力感測器)；(3)微生化分析及臨診斷(如核酸/DNA/蛋白質/血液等 Bio-MEMS)。

(四) 防禦 (Defense)

防禦使用之 MEMS 系統目前主要針對導航、衛星天線定位和其他應用的智慧感測器優化的不同設備。所採用之 MEMS 組件包含 MEMS 光學系統之紅外(IR)設備、光電開關、顯示器、慣性導航、光通信、夜視、IR 發射器、RF 設備和電源管理等。至於軍事應用，包括用於燃料和液壓監測的壓力感測器、用於飛彈和其飛行導引的慣性感測器、用於夜視鏡的非製冷側之輻射熱計以及用於平視顯示器的微鏡。還有 MEMS 的慣性測量單元(IMU) 和組合感測器用於飛彈飛行控制、動態 GPS 跟踪系統、動態平台穩定、環境觀測、地面探測、飛彈控制、安全和慣性導航系統 (INS, Inertial Navigation System)等。

(五) 航空 (Aerospace)

MEMS 及其模組用於航空垂直領域，需要高品質、高可靠性和經過長時間驗證的技術。此外，對多功能感測器的深入研究和開發(R&D)以及這些感測器對導航穩定性的最終幫助正在為航空垂直領域的 MEMS 市場創造巨大的需求和增長。

全球商用飛機市場有望在未來見證巨大的增長。造成這種成長的主要因素是低油價、消費者信心增強、被壓抑的需求和可用生產能力。感測器、二極體和整流器等航空飛行電子元件的製造商正專注於航空市場，以擴大他們為各種飛機應用提供的產品。隨著商用飛機需求的增加，MEMS 市場正在迅速增長。

MEMS 為機載平台穩定、飛機飛行測試、飛機監控和維護、飛行控制、慣性導航系統和飛行數據記錄等重要應用的基礎。這些創新應用為商用飛機的清潔、高效、可靠和具有成本效益的發動機運行提供解決方案。用於航空垂直領域的 MEMS 組件包括加速度計和陀螺儀，目的是滿足該產業嚴苛的測量和控制要求。

在飛行器中，通常部署多個感測器用於關鍵任務感應而不是一般功能。這些感測器具有高精度、遲滯性和校準性，最適合做為傳遞功用。大多數飛行器中都裝有陀螺儀，用於確定飛行器的姿態。其中機械陀螺儀、光纖陀螺儀(FOG, Fibre Optic Gyroscope)和環形雷射陀螺儀(RLG, Ring Laser Gyroscope)用於多種應用，例如航天飛行器導航和角速度測量。另外還有各種加速度計在飛行器中用於不同的目的。例如，三軸加速度計通常安裝在飛行器上以提供自對準導航能力。

(六) 工業 (Industrial)

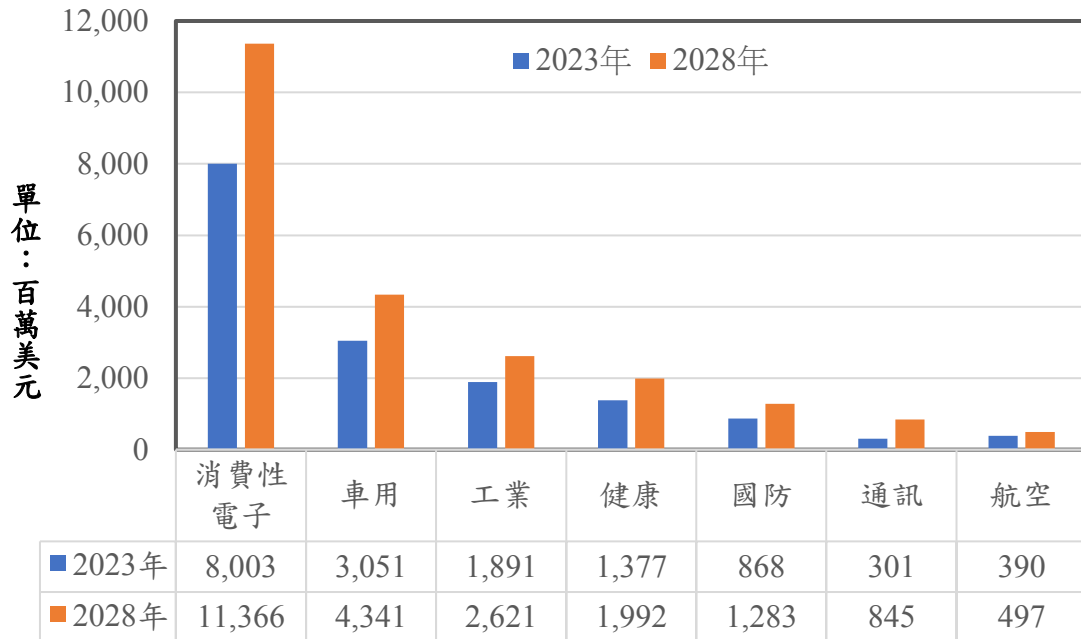
工業應用，不外乎電力控制、傳動控制、以及檢測偵測，目前各類系統技術均已成熟，例如壓力感測器、光學感測器、紅外感測器、化學感測器、氣體感測器、質量流量控制器、聲學感測器、溫度感測器、霍爾效應感測器、加速度計和陀螺儀等 MEMS 已在各種工業應用展開，未來可視應用需求調整或整合，應用於如機器人、建築和工業自動化領域。此外，對於高度自動化之工業 4.0 需求，上述之感測器或致動器可以整合 AI 與大數據之學習，使系統更有效率。MEMS 於上述各領域的應用市場產值預測，如圖 3.4 所示。

四、市場，行銷，營收及利潤

根據 MarketandMarket 產業分析報告，全球 MEMS 市場依照區域可細分為北美、亞太、歐洲和其他等區域。其中亞太區域的市場規模最大，2023 年約為 71 億美元，預估 2028 年將迅速成長至 106 億美元，年均複合成長率(CAGR)為 8.5%。中國、印度和韓國等國家於消費性電子、汽車和醫療保健等領域之電子產品的需求增加，為該區域市場成長的主因。市場規模次大之區域為北美，2022 年北美區域之市場規模約為 44 億美元，預估 2028 年將成長至 63 億美元，CAGR 估計為 7.1%。工業自動化之趨勢、穿戴式裝置與物聯網設備之需求成長、AR/VR 先進產品日益普及等因素，帶動該區域市場的成長。市場規模第三大的是歐洲區域，2022 年歐洲區域之市場規模約為 33 億美元，預估 2028 年將成長至 46 億美元，CAGR 為 6.7%。

歐洲為全球汽車生產製造之樞紐，汽車產業之發展以及對安全性與排放之要求等因素，為該區域市場成長的重要驅動力。

消費性電子領域，預估 2028 年將成長至 113.5 億美元，佔全球近 50% 是 MEMS 之主要應用領域。



資料來源：Market and Market (2023)

圖 3.4 MEMS 應用市場預測 (2023-2028)

五、國內、國外之微機電產業競爭

MEMS 市場競爭激烈，2022 年 MEMS 市場前 10 名廠商包括羅伯特博世 (Robert Bosch; 德國)、博通 (Broadcom; 美國)、科沃 (Qorvo; 美國)、意法半導體 (STMicroelectronics; 瑞士)、德州儀器 (Texas Instruments; 美國)、樓氏電子 (Knowles Electronics; 美國)、英飛凌 (Infineon Technologies; 德國) 和 GoerMicro (中國)，估計佔整個 MEMS 市場的 50%。

這些公司之業務從研發、設計和製造 MEMS 組件和感測器之製造，產品應用領域包含汽車、消費電子、國防、航空航天、工業、醫療保健和電信等行業。

MEMS 市場的前 5 大廠商提供多樣化的產品組合，為消費者提供各種環境、慣性和壓力感測器。其中德州儀器提供大量感測器，如濕度感測器、磁感測器、雷達感測器和溫度感測器等。隨著市場的快速增長，這些公司在 MEMS 產品的研發方面投入了大量資金，Knowles Electronics, LLC、

Goertek microelectronics Inc.和 Hewlett Packard (HP)等 MEMS 重量級公司的行動則再受 MEMS 市場重視。

MEMS 市場的廠商以在歐洲和美國為主。例如，意法半導體的總部設在瑞士。歐美企業進軍亞太 MEMS 市場的關鍵戰略之一是收購。Syntronix Asia 於 2021 年被英飛凌科技收購。羅伯特博世（德國）、博通（美國）、Qorvo（美國）、意法半導體（瑞士）和德州儀器（美國）等 MEMS 市場的前 5 大廠商也都利用併購進行產品或技術擴展。隨著物聯網設備和可穿戴設備的採用不斷增加，MEMS 市場公司的營收入也在增加。2022 年 MEMS 市場前 5 名廠商的收入估計在 37%到 42%之間。在 MEMS 市場，價格競爭非常激烈，這些廠家依靠其強大的研發能力、經銷通路、供應商合作夥伴關係以及經營成熟和新興市場來擴大其市場佔比，並且利用產品開發、擴張和收購，以提高他們在 MEMS 市場的地位。

（一）博世 (Bosch)

博世集團是全球領先的技術和服務供應商。博世 94%的股份由慈善機構羅伯特·博世基金會(Robert Bosch Stiftung)持有。其業務分為四個業務部門：移動解決方案、工業技術、消費性產品應用以及能源和建築技術。其中移動解決方案之主力業務為汽車電子之電子控制單元和半導體(積體電路和感測器)的製造和工程服務，另外它也是物聯網產品供應商，以及智能家居、工業 4.0 創新方案之領頭羊。

（二）博通 (Broadcom)

博通是一家設計、開發和提供範圍廣泛的半導體和基礎設施軟體解決方案的全球技術公司。對於半導體和軟體設計著墨多年。設計、產品和軟體開發工程資源遍佈美國、亞洲、歐洲和以色列。Broadcom 設計的產品和軟體是用於半導體器件，主要是複雜的數位應用和混合信號互補金屬氧化物半導體(CMOS)的元件和邏輯應用之 III-V 族產品。Broadcom 在半導體領域的產品眾多，用於企業和數據中心網路、家用網路、數位視訊轉換盒、寬頻連結、電信設備、智慧手機和基地台、數據中心伺服器 and 儲存系統、工廠自動化、發電和替代能源系統以及電子顯示器。該公司還提供關鍵任務光纖通道存儲區域網路(FC SAN)產品和相關軟體應用，包含多種半導體之模組、開關和次系統。

（三）科沃 (Qorvo)

Qorvo 主要業務包含無線、有線和電源產品。該公司的產品組合中有 200 多種。分佈在行動產品(MP)、基礎設施與國防產品(IDP)。在行動產品

方面提供智慧型手機、可穿戴設備、筆記型電腦、平板電腦和物聯網(IoT)等可用之行動網路、超寬頻 IEEE 802.15.4z (UWB)、Wi-Fi 和其它無線通訊解決方案。在國防應用提供射頻(RF)、系統晶片(SoC)和電源管理解決方案，電源管理應用包括 IT 基礎設施、汽車、可再生能源、國防和物聯網。Qorvo 的晶圓製造位於美國北卡羅來納州、俄勒岡州和德州。組裝和測試分佈於中國、哥斯達黎加、德國和德州。Qorvo 在亞洲、歐洲和北美設有設計、銷售和製造中心。主要銷售分佈在北美、亞洲和歐洲的 17 個國家/地區。

(四) 意法半導體 (STMicroelectronics)

ST 為一家半導體製造和供應商，該公司開發、製造和銷售包括分立器件和公規商品組件、定製元件和半定製元件，以及專用標準和整合電路。STMicroelectronics 是歐洲最大的半導體合約製造和設計公司之一，擁有半導體晶圓廠和後段組裝工廠。在北美、亞太地區、歐洲和其他地區都有業務。全球擁有 14 個主要製造基地。STMicroelectronics 的 MEMS 和感測器，涵蓋各種應用，從用於物聯網和電池供電應用的低功耗設備到用於精確導航和定位、工業 4.0、增強虛擬實境組件和智慧手機的功率元件。STMicroelectronics 與 Robert Bosch (德國)、Analog Devices (美國)、NXP Semiconductors (荷蘭)、Texas Instruments (美國) 和 Panasonic (日本) 等主要國際公司互為競爭。主要客戶包括 Apple、Bosch、Continental、Delta Electronics、HP、Huawei、Intel-Mobileye、Samsung、Seagate 和 Tesla。

(五) 德州儀器(Texas Instruments)

TI 為全球半導體電子設計之 IDM 公司。設計、製造和銷售業務分佈於 30 多個國家/地區。產品組合多樣化，可用於轉換和放大信號、連接其他設備、管理和分配電源、處理數據、消除雜訊以及提高訊號分辨率。產品組合大約 80,000 種。

Texas Instruments 有兩大發展主軸，其一為協助客戶開發電子產品和新應用，尤其是在工業和汽車市場。其二為模擬設計，包括電源和訊號處理。嵌入式產品包含工業和汽車應用之微控制器、數字信號處理器(DSP)和應用處理器。Texas Instruments 在北美、亞洲、日本和歐洲都有業務管道和半導體製造基地。

除了擁有強大產品組合和更大客戶群的前 5 名參與者之外，很少有其他參與者見證了市場的可觀增長。這些參與者可能會成為 MEMS 市場主要參與者的競爭威脅。類似的參與者包括 Honeywell (美國)、TE

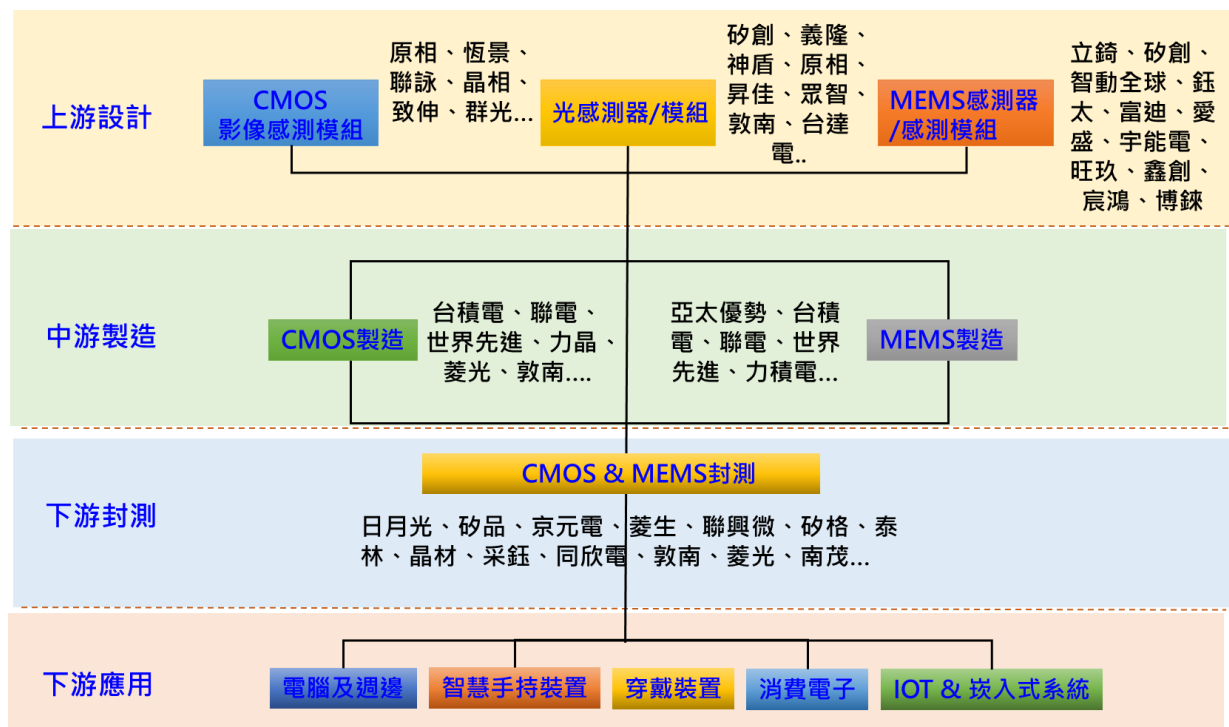
Connectivity (瑞士)、恩智浦半導體 (日本)、松下集團 (日本) 和 Analog Devices (美國)。

(六) 台灣廠商

大多以具有產量之與 CMOS 相容的 MEMS 元件(如慣性感測器、MEMS 麥克風等)來開發建立相關產業鏈，以維持廠商的競爭力。對於小量多樣的 MEMS 元件，主要以新創的 MEMS 設計公司為主，搭配產業既有的量產及 ITRI 法人的小量試量產製程條件，進行較長開發時間的新產品上市。國內目前大部份產品需求僅需要用 4~6 吋廠生產即可，但最近投入的廠商均以 8 吋或 12 吋晶圓廠為主。主要 MEMS 廠商有台積電、聯電、亞太優勢、日月光、矽品、南茂等主要代工和封測大廠，與聯發科、義隆、原相、鑫創科技、昇佳電子、鈺太科技、台灣晶技與美律等主要 IC 設計與元件生產公司。

六、產業結構

我國微機電產業結構尚屬完整，依照上游設計、中游製造、下游封測、下游應用做劃分，而臺灣感測器廠商約 85 家左右，從業人員約 30,000 人左右。平均毛利率大於 20%，研發佔營業額比重大於 10%，與國內 IC 設計產業研發密度水準相當。供應鏈上游設計廠商約 30 家，中、下游製造封測廠商同樣接近 30 家，台灣感測器之產業結構如圖 3.5 所示。



資料來源：工研院產科國際所(2023/09)

圖 3.5 台灣感測器(含 MEMS)產業結構

目前國內設計業者在光學感測器表現相對較佳，因此在中國大陸智慧手機市場取得不錯市佔率，MEMS 裝置由 Bosch、Broadcom、Qorvo、STM、德州儀器、Qualcomm、TDK、InvenSense、Knowles、AKM、Denso 等歐美日領導廠商囊括全球超過 4 成市佔率。然而，在 MEMS Foundry 方面，製程則除 CMOS 影像感測器之外的力學&磁學、聲學、電化學&熱學 Sensor 多採取此一製程技術，目前代工廠商主要有台積電、亞太優勢與昇陽國際等業者投入。國內亞太優勢、台積電、聯電等業者也分別進入全球前二十大廠商之列，尤其台積電已名列全球前三大。下游部份的封裝與測試業者，此一領域則可分為 CMOS/MEMS 製程封裝業者與 CMOS/MEMS 製程測試業者。CMOS/MEMS 製程封裝業者主要代表廠商有精材、日月光、同欣電、勝麗國際、南茂...等廠商。CMOS/MEMS 製程測試業者主要代表廠商則有京元電、采鈺、菱生、矽格、南茂、欣銓等廠商。

臺灣 MEMS/感測器產業的聚落多集中在新竹縣市與大臺北地區，產業體系緊密結合、高度分工，優點是可維繫成本優勢。如新竹縣市匯聚了感測器上游設計、中游製造、下游封測各環節代表廠商，大臺北地區以感測器設計公司為主，與新竹地區僅 1 小時車程於產品設計營銷串聯皆相當迅速與順暢。且中大規模的代表廠商多聚集於此，故此一地區感測器產值佔總體產值達到 7 成。對比之下，中南部之群聚現象顯得較為零散，廠商大多零星分布於苗栗、臺中、臺南、高雄等地。相關區域雖仍有日月光、台達電、晶電、奇景等領導業者座落當地，但缺乏週邊完整產業鏈業者支援，且廠商家數相對較少，故產值佔總體產值比重僅約 3 成水準。

我國品牌廠商較少，整體產業以 ODM(Original Design Manufacturer) 和 OEM(Original Equipment Manufacturer) 型態為主，上游元件設計公司能量相對較弱，中、下游製造與封測業者技術實力較強，目前國內下游系統品牌大多仍採用國際大廠之設計方案，國內零件進口替代效果仍不明顯，以感測元/器件為例，相關設計產品雖有能力出口，但仍以強調低成本價格的中國大陸為主要出口地，產業聚落則多集中在新竹地區。隨著全球發展趨勢，目前 MEMS 相關下游應用有近 90% 屬消費性產品；臺灣之感測元/器件主要應用也以消費產品為主，而此類型產品較容易受到景氣循環或者終端市場區域敏感度變化的影響。

第四章 結論及建言

一、結論

微機電技術無所不在的應用於幾乎所有的產業，就促成產業自動化、自主化及智慧化的進展來看，是如此重要的不可或缺。微機電系統已廣泛的應用在汽車、消費電子、工業、醫療保健、電信通訊和航空等各種蓬勃發展的產業中，而在最近廣為各界前瞻關注的，如智慧生活、健康樂活、能源與環境、低碳製造等新興應用領域中，微機電系統更是位在樞紐，精準微機電感測器感測蒐集的數據，更是當前產業智慧化大勢中，人工智慧技術發展的必要依據。微機電系統暨技術對促成當前政府正推動的「六大新戰略產業」即資訊及數位、資安卓越、臺灣精準健康、綠電及再生能源、國防及戰略、民生及戰備等六大產業而言，是絕對必要的關鍵技術。

國內微機電之上、中、下游業者營運條件各有不同，上游設計業者，設計的產品經代工生產後行銷，直接面對市場上的技術及價格競爭，營運資金的消耗及對公有技術平台輔助的期待及需求最多，不能不說營運壓力最大。中-下游的代工封測業者，有相對優良的技術及產業規模，還有競爭優勢。下游的微機電產品開發應用業者，則藉由開發出具有市場需求的利基產品，也有樂觀的營運。

雖然上述產業不同位階所面對的營運環境有別，然為促成整體微機電產業之全面發展來考量，所以提出如下客觀務實的產業發展建議及政策建言供政府之產業主管機關參閱。

二、產業發展建議

MEMS 與智慧感測器產業是一個光機電材高度異質整合技術、跨域人才與資金密集的產業。產品從開發設計到製造應用，需要相當多的經驗，存在許多技術挑戰，進入市場並非易事。儘管有許多新的 MEMS 與智慧感測器正在開發中（無論是新興元件還是傳統元件，或來自全新的參與者），通常需要時間才能跨越全面商業化的差距。且創新的 MEMS 產品在許多情況下是由 Fabless 新創或小型公司所開發，長期投入資金對中小型企業並不容易。再則企業規模小，產品也多處於研發階段，因此尚不具備 IDM 能力，而 MEMS 產品又是差異化產品，製造技術與傳統產品差異較大，大型 Foundry 企業通常以大量生產為主，不願意支持開發利基型產品。在全球晶片競爭中，除了必要政策與資金支持外，更需要專業的 MEMS 與智慧

感測器晶片從創新研發到可試產之製程平台設備支持，透過政策引導企業進行 Fabless IDM 新創公司合作或整併，設立全新並具備最先進技術的廠區，進行在地設計、生產、應用，縮減研發時間，降低開發成本，同時協助國內 MEMS 產業鏈跨越死亡之谷與提升國際競爭力。此外，台灣 MEMS 上游設計相對薄弱，有必要與國外公司積極合作(非代工客戶關係)，建立長期合作夥伴關係，而小公司多半較無談判籌碼，若能結合多元能量，較有機會取得合理對談空間。

目前 MEMS 產品主力應用為消費性及工業/國防領域，換言之，佈建 IOT 之共通性平台，發展軟硬體與強化 AI/IoT/5G 整合與服務能量，將可增加 MEMS 下游產品應用，刺激高階產品儘快進入市場，先進技術快速落地，縮短產品少量多樣之壓力。因此需設立 MEMS 研發中心，MEMS 製造、測試與試產平台，引導產業朝向高值化發展，鼓勵業者切入國際主流廠商已經開始佈局之平台與服務，以此提升產品附加值。

所以，產業發展建議歸納如下：

1. 政府對微機電產業提供必要的政策與資金支持；
2. 政府提供製程平台設備以支持，從 MEMS 創新研發到可試產的專業服務；
3. 透過政策引導企業進行 Fabless IDM 新創公司合作或整併，設立全新並具備最先進技術的廠區；
4. 設立 MEMS 研發中心，MEMS 製造、測試與試產平台，引導產業朝向高值化發展；
5. 台灣 MEMS 上游設計廠家，與國外公司積極技術合作，建立長期合作夥伴關係，以取得與代工業者之合理對談空間；及
6. 鼓勵業者切入國際主流廠商已經開始佈局之平台與服務，以此提升產品附加價值。

三、產業政策建議

Sensing 與 AI 結合將成大勢所趨，感測器將具備更多自主判斷能力，滿足更多個人化應用與工業/環境/國防等需求。IoT 創新系統與應用需求快速成長，帶動 MEMS/CMOS/印刷式各類製程感測器同步發展，除使市場規模穩步擴充外，也將創造出更明顯的經濟價值。本研析報告為求更貼近產業聲音與需求，針對台灣微機電產業具代表性之廠商中拜訪 8 位高階主管

進行深入訪談，從微機電設計、製程代工、封裝、系統應用，綜整產業專家觀點有三：

1. 台灣具發展利基：微機電技術是提供支撐產業長期持續創新、創業、創富的先端技術，MEMS 也是促成產業革命的最佳利刃(如：MEMS 麥克風取代傳統電容式麥克風、RF MEMS 取代石英振盪器)，因晶片化與微型化，可發展更具成本優勢與廣泛應用的產品。台灣已具的半導體產業鏈優勢，新穎獨創的元件均可在國內進行代工，在此基礎上，集合法人與學界能量，建立一個大規模的產業政策來推動與輔助企業發展，以十年磨一劍的決心，定能開花結果，為台灣產業創造下一波成長引擎。
2. MEMS 為高附加價值產業：高門檻的 MEMS 技術，研發期長且需跨域整合，但即使開發的元件是 Me too 也是剛需市場(如：IR、加速度計)，且產品生命期會很長，創業成功之感測器廠商投資回報率相對高。
3. 他山之石：MEMS 應用領域廣，可借鏡歐美跨國合作之成功模式與面對中國巨資投入集研發、量產製造、封測與應用為一體的 6~12 吋 MEMS 晶片製造平台的威脅，加強提升法人開發新元件、建立客製化的設計驗證服務能量，更可吸引國際新創公司來台下線，並促成人才的交流與培養。

近年來，各國政府競相建立自有半導體供應鏈，包括鞏固感測器產能並發展感測及 MEMS 關鍵技術，未來將形成更明顯的國家區域產業競爭態勢。鑑於全球政府政策積極推展感知科技創新應用、扶植相關產業鏈提升國家競爭力，建議我國應推動產學研之策略合作，持續及擴大投入研發資源，進而促進感知科技產業應用的轉型升級。

台灣具備強悍的半導體製程技術能力與 IC 設計能量，切入異質感測器整合與感測資料融合的開發具有相當的優勢，可透過此能量建立台灣微機電產業樞紐地位，滿足全球新興應用與長尾應用之感測器需求。面對全球新興議題的需求，如智慧生活、健康樂活、淨零碳排、韌性社會、國家安全，感測技術需要轉型走向整合化與融合化，過去類標準化產品面臨多樣態的新挑戰，可以串聯國際學術研究與 Fabless 新創公司之手段，建構快速試製與驗證基地，打造感測設計製造與創新應用樞紐重地。

專有名詞中英文及縮寫對照表

專有名詞	英文名稱	中文名稱
AOP	Acoustic Over Point	聲學過載點
ANC	Active Noise Cancellation	主動式降噪
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems	先進、高級駕駛輔助系統
AI	Artificial Intelligence	人工智慧
ASIC	Application Specific Integrated Circuit	特定應用積體電路
AR	Augmented Reality	擴增實境
ASP	Automotive Spare Parts	汽車備用零件
AMR	Autonomous Mobile Robot	自主移動載具(無人機)
BAW	Bulk Acoustic Wave	體聲波
cMUT	Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer	電容式微機械超音波換能器
CNT	Carbon Nanotube	奈米碳管
DAQ	Data Acquisition	資料擷取
DBS	Deep Brain Stimulation	腦部深部刺激器
DRIE	Deep Reactive Ion Etching	深反應離子式蝕刻
DOF	Degree of Freedom	自由度
DSA	Digital Serial Analyzer	數位串列分析儀
DMS	Drive Monitoring System	駕駛狀態監視系統
ECU	Electronic Control Unit	電子控制單元
EDM	Electrical Discharge Machining	放電加工

專有名詞	英文名稱	中文名稱
EIS	Electric Image Stabilization	電子影像穩定
ESC	Electronic Speed/Stability Controller	電子速度控制器、電子穩定控制器
FOG	Fiber Optic Gyroscope	光纖陀螺儀
FCSAN	Fibre Channel Storage Area Networks	光纖通道存儲區域網絡
FIFA	FIFA World Cup™	FIFA 世界盃足球賽
FBAR	Film Bulk Acoustic Wave Resonator	薄膜體聲波共振腔元件、薄膜體聲波諧振腔
GCT	Gate Control Theory	門控制理論
HUD	Head-Up Display	抬頭顯示器
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning	車內溫度感測器、通風和空調系統
IDP	Integrated Defense Products	國防產品
IMU	Inertia Measurement Unit	慣性測量單元
INS	Inertial Navigation System	慣性導航系統
IR	Infrared	紅外線
ICP	Intracranial Pressure	顱內壓力
IVD	In Vitro Diagnostic Device	體外檢測裝置
LBS	Laser-Beam Scanning	雷射光束掃描
LiDAR	Light Detection And Ranging	光學雷達
LRS	Limited Resource Setting	資源匱乏的醫療應用
MAP	Manifold Absolute Pressure sensor	進氣壓力感測器
MEMS	Microelectromechanical Systems	微機電系統

專有名詞	英文名稱	中文名稱
MOEMS	Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems	微光機電系統
MST	Micro Systems Technology	微系統技術
MRI	Magnetic Resonance Imaging	核磁共振造影
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration	美國國家公路交通安全管理局
NHGRI	National Human Genome Research Institute	國家人類基因組研究所
NIH	National Institutes of Health	美國國家衛生院
NIDCD	National Institute on Deafness and Other Communication	美國國家耳聾和其他溝通障礙研究所
OIS	Optical Image Stabilization	光學影像穩定、光學防手振
OLED	Organic Light-Emitting Diode	有機發光二極體
PST	Patient-Self Testing	自我檢測的裝置
POLD	Physician Office Lab Diagnostics	體外診斷裝置
PMUT	Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducer	壓電超音波換能元件
POCT	Point-Of-Care Testing	定點照護系統
QCM	Quartz Crystal Microbalance	石英晶體微天秤
RF-MEMS	Radio Frequency-MEMS	微機電射頻
RIE	Reactive Ion Etching	反應離子蝕刻
RLG	Ring Laser Gyroscope	環形雷射陀螺儀
SNR	Signal-to-Noise Ratio	訊噪比
SOG	Silicon on Glass	矽玻璃

專有名詞	英文名稱	中文名稱
SOI	Silicon on Insulator	矽晶絕緣體
SSD	Single Sided Deafness	單側耳聾
6G	6 th Generation mobile networks	第六代行動通訊系統
SPL	Sound Pressure Level	聲壓位準
SAW	Surface Acoustic Wave	表面聲波
SoC	System on Chip	系統晶片
TCXO	Temperature Compensated Crystal Oscillators	溫度補償晶體振盪器
TFBAR	Thin-Film Bulk Acoustic Wave Resonator	薄膜體聲波諧振器
TPMS	Tire Pressure Monitoring System	胎壓偵測系統、胎壓計
THD	Total Harmonic Distortion	總諧波失真
TWS Headphones	True Wireless Stereo Headphones	真無線藍牙耳機
UHL	Unilateral Hearing Loss	單側聽力損失
US FDA	US Food and Drug Administration	美國食品和藥物管理局
VAR	Video Assistant Referee	影像輔助裁判
VR	Virtual Reality	虛擬實境
WHO	World Health Organization	世界衛生組織
WWDC	Worldwide Developers Conference	全球開發者大會
XBAR	Laterally-excited Bulk Acoustic Resonators	橫向激勵體聲諧振器

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

台灣微機電產業現況及未來發展之挑戰/張培仁、朱俊勳、許聿翔、鄧志強、陳昱吉、李尉彰、林致廷、黃鎰輝 作. -- 初版. --
- 臺北市：財團法人中技社，民 112.12
158 面；21×29.7 公分
ISBN 978-626-97025-9-6 (平裝)

1. CST: 電子業 2. CST: 電機工程 3. CST: 產業分析
4. CST: 產業發展

484.5

112022035

著作權聲明©財團法人中技社

本出版品的著作權屬於財團法人中技社(或其授權人)所享有，您得依著作權法規
定引用本出版品內容，或於教育或非營利目的之範圍內利用本出版品全部或部分
內容，惟須註明出處、作者。財團法人中技社感謝您提供給我們任何以本出版品作
為資料來源出版的相關出版品。

未取得財團法人中技社書面同意，禁止改作、使用或轉售本手冊於任何其他商業
用途。

免責聲明

本出版品並不代表財團法人中技社之立場、觀點或政策，僅為智庫研究成果之發
表。財團法人中技社並不擔保本出版品內容之正確性、完整性、及時性或其他任
何具體效益，您同意如因本出版品內容而為任何決策，相關風險及責任由您自行
承擔，並不對財團法人中技社為任何主張。



財團 中技社
法人

CTCI FOUNDATION

106 台北市敦化南路2段97號8樓

Tel : 02-2704-9805~7 Fax : 02-2705-5044

<http://www.ctci.org.tw>



使用再生紙印製