



土木工程在高科技廠房工程的角色

張陸滿／國立臺灣大學土木工程學系 名譽教授

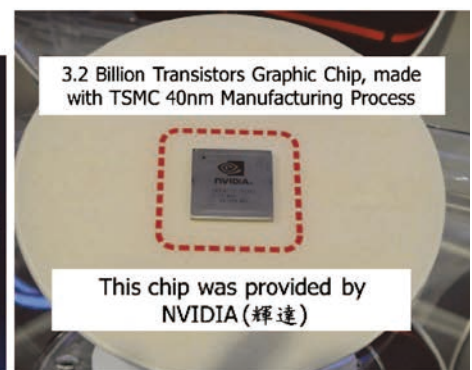
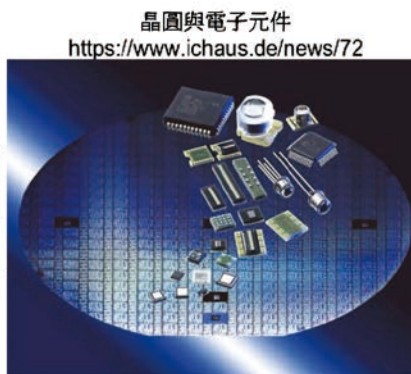
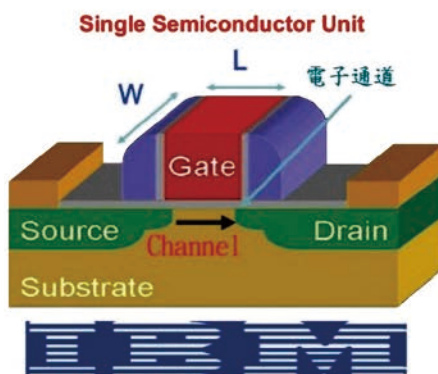
高科技廠房是指高科技產業製造中所需的工廠，包括建築、水電空調、儀表控制、管線設備、廢水廢氣處理、環境生態保護等等設施。高科技廠房工程係指規劃、設計、採購、施工、試車、移交、維護及經營管理這些許許多多設施之相關工程。台灣高科技生產背後之核心產品就是半導體，因此，本文所討論的高科技廠房是以製作半導體晶圓之廠房為例，期望藉此例，讓讀者更具體地瞭解土木工程在高科技廠房工程中所扮演的角色。

高科技廠要求高潔淨高精準

高科技廠房與一般工業廠房，其最大的差別就是在製程環境之潔淨度以及製程中所要求的精準度有所不同。高科技產品生產的核心地帶，是在潔淨室（cleanroom）或稱無塵室裡面，因為製程中所要求的環境之潔淨度是可以在這裡有效確保。試想要在小小1吋見方的晶片上，在重複做微影（Photolithography）、蝕刻（Etching）、離子植入（Ion-Implantation）、氣相沉積（Vapor Deposition）後，製造出幾十億奈米級可以傳輸電子通道的半導體單元（Single Semiconductor Unit），同時連絡這幾十億半導體單元而成盤根錯節、

複雜萬分的積體電路，爾後測試封裝成各式各樣可用的電子元件。

在製作當中，若元件內外被一點點細微的異類雜質污染；都可能造成電子通道之品質不良，改變電子通道電阻電壓，肇致訊號指令不清，終端電子器械無法操作。甚至，空氣中若有滲雜工作人員之汗酸味，就可能污染晶片，導致多分子晶片裏面的線路不通暢或不通，那麼晶片就可能會短路、失敗了。同時，製作過程當中，一個小小微振動可能弄得微影混淆模糊，看不清楚，更不要說進一步的量測製作。這種精準潔淨度的奈米觀，實不易被一般看慣大尺寸（公尺，立方公尺、公里）的土木工程人員去想像理解的。

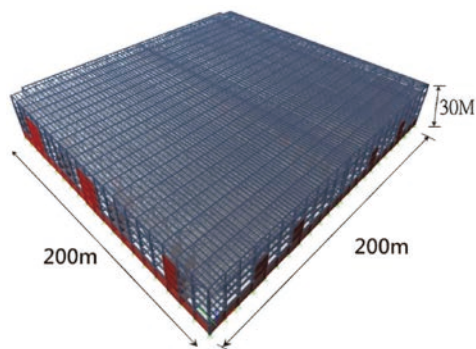


土木工程之各學術領域

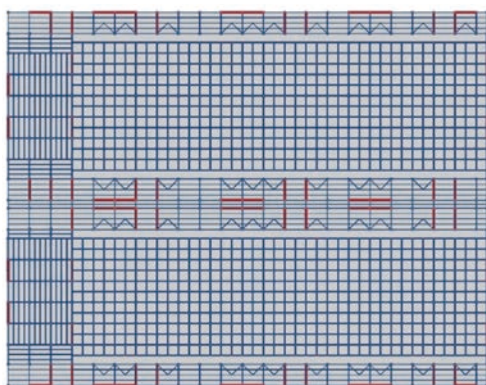
根據一般教學研究之功能，土木工程大約可細分成：大地工程、結構工程、水利工程、環境工程、交通工程、營建工程與管理、電腦輔助工程、測量與空間資訊工程、土木材料工程等學術領域，本文據此嚐試一一說明土木工程各學術領域在高科技廠房工程的角色，希望讀者閱讀後，能進一層瞭解到土木工程各學術與高科技廠房工程之介面盤根錯節，息息相關，土木工程在高科技廠房工程中扮演不可或缺的角色。

大地工程與結構工程

當半導體之製程技術縮小到 100 奈米以下時，由於製做程序變多而複雜、要求精準潔淨度更是嚴謹，再由於大尺寸的晶圓可以切割較多的晶片，12 吋可以較 8 吋切割出 2.15 倍的晶片。於是，晶圓尺寸從 3 吋、4 吋、8 吋、12 吋逐級擴大，而其相對的生產機台，其大小也必須擴大，所以廠房結構體變得更加龐大，其大地與結構之設計更須有牢固穩健的考量，如栗正暉提供之下圖，一座典型的 12 吋半導體晶圓廠之結構體大小約 200 公尺 × 200 公尺 × 30 公尺，並多處建構防震之剪刀牆。



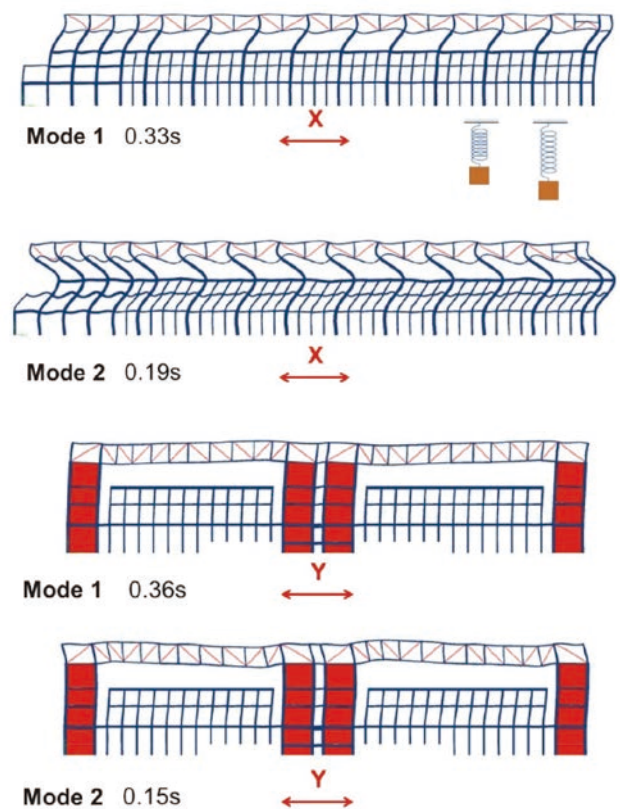
典型的 12 吋半導體廠

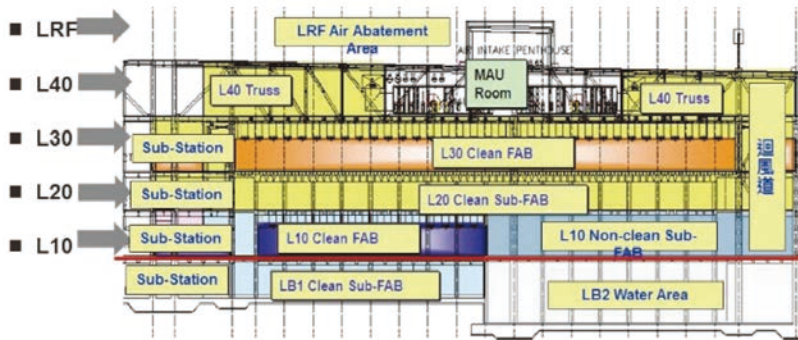


平面圖之紅色所示為剪力牆

又，半導體高科技的研發製造中，必須運用高性能的製造設備 (Tools)、精準敏銳的儀器 (Instrument) 和超純淨的水、電、空氣、化學原料等等的廠房公用設施 (Utilities)。而這些研發製造程序必須在嚴格控制的潔淨無塵室中，穩定的製造平臺上，及 / 或沒有在電磁波干擾的環境下進行。許許多多的製造設備、精密儀器與公用設施、因為都要架設在土木工程的土壤結構上，同時須解決因地震、噪音、電磁波 (EMI)、射頻 (RF)、氣流、機臺共振等等所衍生的振動問題。如此，可以想像高科技廠房工程裡的土木大地工程與結構工程系就有大顯身手的機會。

除一般耐震減震之傳統結構設計外，進十年來發現半導體廠的自然頻率約在 3-4Hz 之間，也就是說即使大地震 (高頻率) 發生在日本、印尼，其高頻振動波最後到達台灣時就變成長波低頻的頻率，若剛好落在 3-4Hz 之間，如此，即刻肇致的共振，而嚴重破壞廠房設施。因此，如何防止微震動 (Micro Vibration) 的共振損害，也是廠房大地與結構工程設計的新議題。因此，運用下圖模擬分析 (Modal Analysis)，以及建立早期地震預警系統 (Early Earthquake Warning System, EEWS) 更是結構工程師可貢獻的所在。(資料來源：陳錦村)





高科技廠的剖面圖 (李宗軒提供)



施工中的高科技廠結構工程 (栗正暉提供)

● 施工前置規劃-基地調查

- 地質鑽探、地下水位調查
- 基地高程覓測
- 試樁(破壞性試驗)·確認基樁設計參數



大地與測量工程 (宋思賢提供)



● 結構施工分類概述

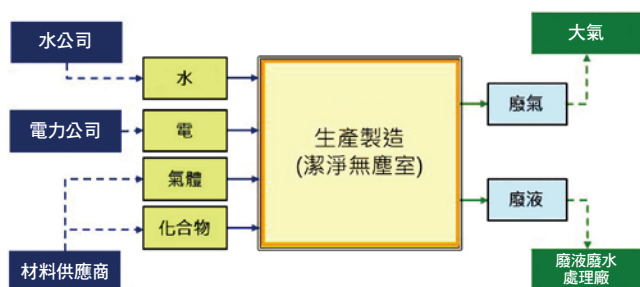
- 基礎
- 基樁
- 地下室結構體
- 地下隧道



基礎工程 / 下部結構 (宋思賢提供)

水利與環境工程

而，高科技廠生產需用大量之水、電和化學原物料，其中水和化學原物料之淨化，其使用後之廢水、廢氣、廢化學液的處理和回收再生、興建營運中之節能減炭以及環境生態之保護，樣樣都與土木的水利工程及環境工程有關。下圖所示係水、電、大宗氣態及液態化學物傳輸到高科技廠房潔淨無塵室，供其生產之用，使用後，其廢氣、廢水、廢化學液等均須經處理至合乎規定，才能釋放到大氣或河川海洋裡如下圖所示 (資料來源：鄭昭平提供)。



交通工程

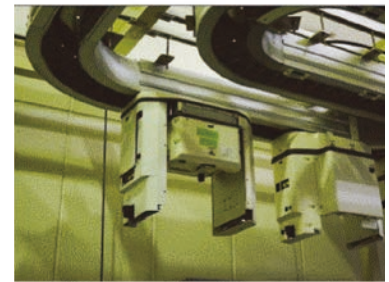
在每月能生產 10 萬片晶圓 (Wafer) 的集合互連式之半導體廠 (Giga Fab)，廠中使用約 2,500 台生產機台 (tools)，並有晶圓傳送盒 (FOUP) 約 2,000 台。晶圓盒不斷從一個機台完成一製程後，裝載傳送晶圓到另一個機台，晶圓抵達另一個機台時，不是即刻就可輪到該傳送盒內的晶圓進入下一步製作，往往需要在另一個機台邊的儲料櫃 (Stockers) 等候下一步的製作，廠內約有 250 座儲料櫃，如此 2,000 台的晶圓盒不斷從一個機台裝載傳送晶圓到另一個機台，再傳送到另另一個機台，估計每天輸送的路程長達 500 公里，這集合互連式之半導體廠的物料 / 晶圓搬運系統 (Automated Materials Handling System, AMHS，其軌道長約 40 公里，若將這懸吊的晶圓搬運系統之軌道翻轉過來，這幾乎可以形同一個大都會的捷運系統。

尤其，當半導體晶圓製造尺寸從 8 吋擴大到 12 吋，由於 25 片晶圓裝在一個晶圓傳送盒內已重到非一般人可以提送，必須靠自動化物料 (晶圓) 搬運系統來輸送。導致新世代的高科技廠房變成幾乎是無人

<http://img.technews.tw/wp-content/uploads/2014/04/Semiconductor.jpg>



幾乎無人的半導體晶圓廠



OHT: Over Head Transporter



OHS: Over Head Shuttle

自動晶圓搬運系統

的自動工廠。而，半導體晶圓之製做程序可能高達數百道，生產機台間，其原料、半成品、成品無論運用有軌道、無軌道的自動輸送系統 (Automated Materials Handling System, AMHS)，都很需要土木交通工程專家來將之最佳化，幫每一台傳送盒找出最近路徑和在儲料櫃中等候時間降到最低。

營建工程管理

高科技廠房之施工特性，具有工期短、動員人力多、材料設備多、空調水電化學管路多、施工界面多且較傳統營造錯綜複雜。雖要求速度快，但對品質規格、潔淨控制及精密度上仍是不得馬虎的。傳統營建工程管理所能容忍的工程誤差，卻是高科技廠房營建管理所無法容忍的。或許可以用這樣的反差比喻來形

容，高科技廠房之營建工程管理講的是微觀的污染控制，而傳統營造業講的是巨觀的結構功效。

因此，高科技廠房之營建工程管理者除了需具備本身的專業知識與技術能力之外，也需要在土建、機電、管線、儀控... 等等專業間從事界面協調整合。因此，亦需要有各專業的基本知識及實務經驗。所以，高科技廠房之營建工程管理，需憑藉著整體完善之規劃、嚴謹的時程管控以及有效的成本控制，以降低建廠過程中不必要的工期延誤，成本增加以及工安環衛不良之風險。在全球資訊化時代，高科技業的商業轉交貨期程，一天都延誤不得，建廠時程一天的延誤，可能就是上億以至上千億的商業損失。廠房準時完工通常是毫無妥協之地，這些都需土木營建工程人員面面俱全的妥善管理。下左之施工圖係源自許金榮。



潔淨無塵室的施工

(資料來源: M+W Group)



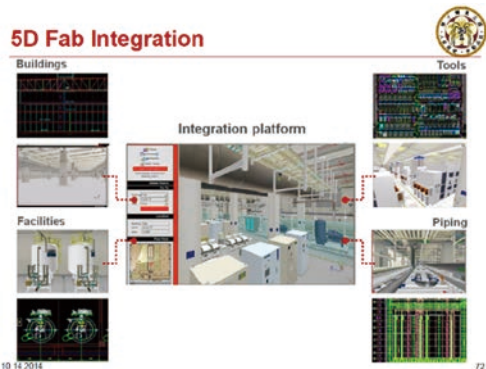
高科技廠規模愈來愈大但建廠時程愈來愈小

另外，一座高科技廠約 1 仟~ 3 仟億臺幣，施工人員可從 5 千至 1 萬 5 千人左右，協力廠家上百，要求從破土到蓋好驗收，在 8~ 10 月完成並移交給生產端去安裝機臺，這些更需土木之營建工程與專案管理人員之整合協調，在安全至上，最佳價值之成本下，如質如期完成。

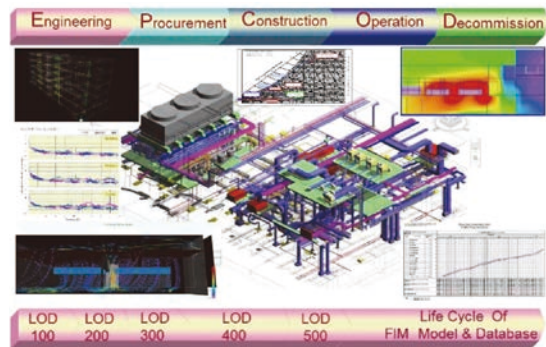
電腦輔助工程

眾所皆知，資訊科技 (Information Technology, 簡稱 IT) 進步神速，CAD (Computer Aided Design, 電腦輔助設計) 技術已廣泛地被運用於各領域。同時，研究學者及 CAD 軟體業者也不斷加強 CAD 的效能，使得 CAD 從 2D (二維平面)，發展到 3D (三維空間)，再發展到

4D (三維空間+時間)，5D (三維空間+時間+成本) 等等，以 3D CAD 加上物件導向 (Object Oriented)、參數化設計 (Parameter Design) 及關聯性 (Relationship) 所形成的建築資訊模型及模擬 (Building Information Modeling, 簡稱 BIM)，正被應用於廠房建築的整個生命週期過程中。在規劃、設計、採購、施工、移交、維修及營運中，以三維度物件 (3D Object) 製圖、模擬、進行更有效率地跨領域之平行設計、審定及溝通。如下圖鄭昭平所提供的，過去使用多張繁複 2D 的套圖，而今，一張簡單的 3D 立體圖，大家便可一目了然。在資訊電子化的時代，土木的電腦輔助工程也是高科技廠房工程中不可或缺的重要環節。



中間 3D 立體圖，旁邊 2D 平面圖 (謝尚賢提供)



3D 立體生命週期圖 (謝尚賢提供)



廠房資訊模型模擬 (FIM) 的功能應用

測量與空間資訊和土木材料工程

而奈米層級的製造，其廠房設施在興建營運上之空間資訊要求嚴謹，其所在基地和所有結構物的高度及位置必須精準明確，特別是精密機台之銜接，若有不當，肇致效率不佳，營運損失，更可能因機台鬆軟不正，導致人員傷亡，如此，土木的測量與空間資訊工程師實責無旁貸。

在奈米科技提昇過程中，很早就發現，這些奈米小原子和原子叢粒子，跟同型原子成份，堆積而成的大型材料有顯著完全不同的特質。當這些粒子大小尺寸變小，其比表面積卻變大，這樣比表面積變大卻對該材料的化學及物理行為有非常大的影響，因此而改變了材料的顏色、表面反應性、光學性、磁性、機械性、熱力性、催化性、或生物性的各種特性，臺灣高科技半導體已進入 5、3、2 奈米的製程，如何將先進奈米材料研發成成果，轉形應用成土木工程材料亦是刻不容緩的課題。

高科技廠中除使用的金、銀、銅、鐵、鋁及錫等各貴重金屬外，也使用相當多的水泥、瀝青、玻璃、陶瓷、油漆、塗料、黏膠及光纖等等。以往高科技廠之興建營運中，衍生大批的廢棄物和製造了無數的廢氣廢液，土木材料工程師如何在過程中廢料減少、再利用和再生 (reduce、reuse、renew)，甚而將稀珍戰略元素，返樸歸真地精淬提煉儲存並循環應用以及如何應用奈米科技研發的成果來增益加強高科技廠房所需材料之應力 (stress)、應變 (Strain)、硬度 (hardness)、疲勞強度 (fatigue)、彈性 (Elasticity)、塑性 (Plasticity)、韌性 (resilience)、剛性 (rigidity) 等等，也是值得土木材料工程師持續努力的方向。

結論

傳統的土木工程是將土木工程中的大地、結構、水利、環境、交通、營建管理、電腦輔助、測量與空間資訊、土木材料等工程領域之原理、技術、方法應用到一般土木營造：譬如房屋、大廈、公路、鐵路、橋梁、隧道、港灣、水壩、機場等等公共設施。在高科技廠房設施中的土木工程則是將土木工程中各學術

領域之原理、技術、方法應用到高科技廠房設施之興建營運工程上。要生產製造必先有廠房，高科技廠房工程涵蓋廠房設施的規劃、設計、採購、施工、移交、維修及經營管理等等議題，是高科技產業生產製造過程中不可或缺的重要環節之一，土木工程師理當積極參與高科技廠房設施之興建營運。

再綜觀高科技之研發創新對未來台灣的經濟及科技有極大的衝擊，台灣高科技產業更已邁入研發創新的時代，要製造必先有廠房設施，製造需要持續地往前研發創新，先進的製造研發創新需要有更高水準的廠房設施工程之配合，高科技廠房工程亦不可等閒待之，更需與時俱進地全力配合，著手相對之研發。下世代之高科技廠房工程的研發創新，應是更大的跨領域結合，除了土木工程各學術領域外，也應包括建築、機械、化工、電機、物理、化學、生物、材料、醫學、農工、生態、法律、管理、經濟、財務、人文、藝術等等，需要各領域優秀的人才來共同提昇台灣高科技廠房工程。

參考文獻

1. Chen, Shih-Ming, Griffins, F.H. (Bud), Chen, Po-Han, and Chang, Luh-Maan. (2013). "A Framework for an Automated and Integrated Project Scheduling and Management System," *Automation in Construction*, Volume 35, pp. 89-110.
2. Chuang, Tzu-Sou and Chang, Luh-Maan. (2013). "To Mitigate Airborne Molecular Contamination Through Ultra-Pure Air System," *Journal of Building and Environment*, Volume 59, pp.153-163.
3. Van Zant, Peter, *Microchip Fabrication: A Practical Guide to Semiconductor Processing*, 4th ed., McGraw-Hill, New York, 2000
4. Wood, David Muir, *Civil Engineering: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, Oxford, United Kingdom, 2012。
5. 張陸滿，「奈米時代之高科技廠房設施工程」，*土木水利*，中國土木水利工程學會，臺北，臺灣，第 35 卷，第 1 期，第 15-26 頁，2008 年。
6. 張陸滿，「高科技廠房設施之關鍵技術」，*杜風電子報*，第 90 期，台灣大學土木系，2015 年 5 月。
7. 陳錦村、張陸滿、陳正興，「遠域地震對晶圓廠的影響」，第十二屆結構工程研討會暨第二屆地震工程研討會，論文編號 1103，高雄，臺灣，2014 年。 