



姓名：胡宇光

學歷：

美國 Wisconsin 大學 Madison 校區博士

現職及經歷：

中央研究院物理研究所研究員

中央研究院物理研究所副研究員

中央研究院物理研究所助研究員



著作名稱：

利用即時相對比 X 光顯微術於電鍍製程研究

微鏡的高解析度和 X 光的穿透力，而可以用來觀察一般光線所見不到的細微結構。

中文簡介：

X光自從一百多年前被發現以來，就是透視物體內部、進行非破壞性檢測時最重要的工具：醫生用來檢查動物體內組織結構的正常與否，保安人員用來檢查包裝內部是否有危險物品。這些應用共通的特點，就是要能透視內部，而不損傷物體，這也是 X 光有別於其他觀測技術之處。但以傳統方式利用 X 光透視，解析度相當有限。目前發展出新的技術 - 相對比 X 光顯微術(phase contrast microradiology)- 使用較佳的 X 光光源以及較精密的顯微成像設備，已成功的融合了顯

在X光顯微術的革命性的發展中，一個重要的基礎來自於成像對比機制的更新。傳統 X 光照相的影像對比，是以物質對於 X 光吸收能力的不同-也就是X光折射係數之虛數部(imaginary part of the index of refraction)的差異-造成物質對X光的吸收因厚度、密度或者是所包含的元素不同而有所變化。這種差異就可以使密度較高含有高原子序Z(如骨骼中的鈣相對於軟組織碳水化合物中的碳)的骨骼在 X 光相片中清楚的顯現出來。但是這種成像機制，特別是當希望提高成像解析度或是希望觀察幾乎沒有 X 光吸收對比的軟組織器官的時候，會有相當的侷限。在人類使

用 X 光的百年歷史中，這個侷限對利用 X 光作為工具的人並不造成困擾，因為與其他光源相比傳統的 X 光源的品質極差，根本無法形成任何除了藉由吸收對比外的其他的對比。

而相對比 X 光顯微術與傳統之 X 光照相術最大不同之處在於它是以 X 光折射係數之實數部(real part of the index of refraction)差異來加強成像之對比。相對比作為 X 光成像機制的可能性在 1994 年被發現可利用同步輻射(synchrotron radiation)取得以前，雖然已得到理論及實驗（利用傳統 X 光源）證實，但其應用之可能性並未得到重視。其理論基礎與傳統光學完全相同，只是 X 光照相術使用之光源波長較短（X 光波長約小於 1Å）而已。相對比 X 光顯微術之所以未受到重視，最主要之原因在於缺乏合適之光源。然而在同步輻射進展到所謂的第三代同步輻射(Third Generation Synchrotron Radiation Source)- 其主要之目標就是在提高光源之亮度及相干性-研究者終於具有足夠之光源相干性嘗試相對比 X 光照相術之研究。在本人與瑞士及韓國之合作者於 1998 年開始此項研究之前，有數個研究群在這方面的研究已取得相當的進展，其中絕大部分之研究是在第三代同步輻射光源所進行的。我們開始此項研究之動機、也是主要的貢獻即是在於理解並證實其實相對比 X 光照相術並不需要第三代同步輻射光源所帶來的高度相干性。根據我們對基本光學原理之理解，不論是利用邊緣折射或是繞射所需要的光源空間及時間相干性都相當的低。也就是說幾乎所有的同步輻射光源（包括二十年前的第零代光源）甚至是某些小型加速器所產生的 X 光都足

以產生顯著的影像加強效果。這項簡單之進展，卻出乎意料之外的帶來了許多嶄新的應用可能性。

這項結論所帶來最明顯利益當然就是幾乎所有的同步輻射光源皆可進行此項應用。此外我們發現對相干性之低要求，進行相對比 X 光照相術時，可使用非單色光。例如我們就使用同步輻射之白光（未經任何分光）即可取得高對比、高解析度之影像。白光之強度一般約較單色光(monochromatic x-ray)強一百至一千倍，也就是說我們之研究帶來了百倍以上之利益。利用白光之高強度，我們進行了首次之高階析度($\sim 1\mu\text{m}$)高對比之即時相對比 X 光顯微術。

我們的研究團隊結合了包括瑞士(Ecole Polytechnique Federel de Lausanne, EPFL)、韓國(Pohang University of Science and Technology, POSTECH)、美國(Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory, APS)的研究人員，經過兩年多不斷的實驗研發，利用相對比的成像原理，研發出了一項以同步輻射 X 光作為光源的透視顯微技術，利用簡化的成像機制及設備，除了可大幅提升 X 光照相的解析能力，可以取得更高的影像靈敏度。應用這種技術，可以在極短的曝光時間之下，得到不論空間及時間解析度都遠比傳統 X 光照相方式的高數千倍的動態影像，而達到可動態觀察物體深層內部次微米結構的嚴苛要求。

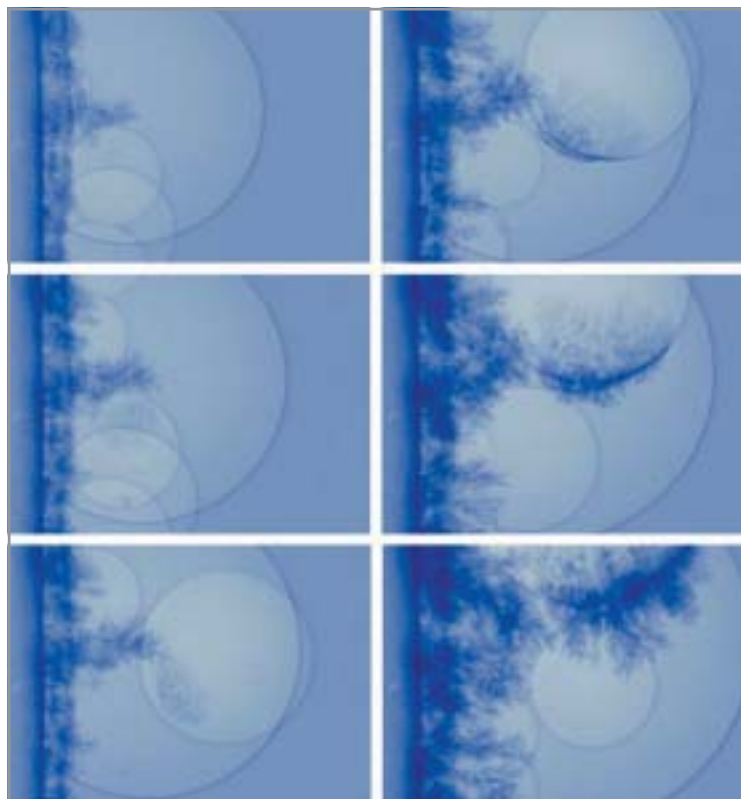
此跨國研究團隊利用這項技術，已在醫學生物材料化學等不同研究領域得到突破性

的成果。在去年（2002 年）五月九日出版的權威科學刊物『Nature』上，此研究團隊共同發表了一篇題為『Building on bubbles in metal electrodeposition』的研究論文，針對電鍍過程中微結構變化，證實利用創新的研究工具，在最常見的電鍍製造的過程中，也可以觀察到一些從未被人發現違反常理卻又確實存在的奇異現象。

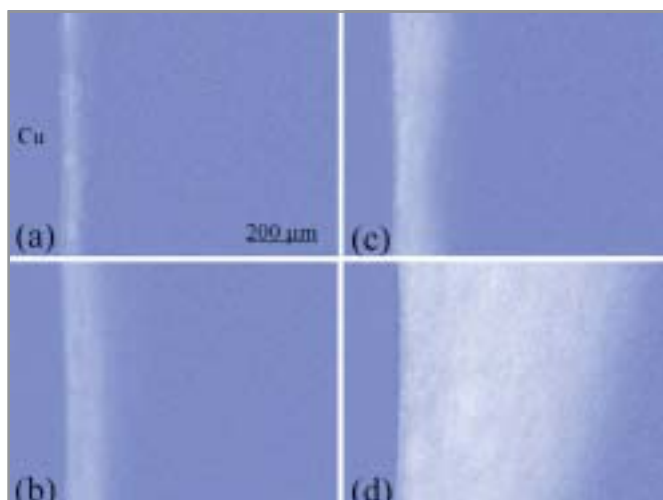
電鍍是一種應用廣泛的工業技術。許多產品，小白腕表、珠寶首飾，大至電腦機殼、汽車及高科技的航太科技材料、以及最先進的半導體製程，都會利用到電鍍的方式，以便將特定金屬均勻的包覆在物件的表面。可是金屬鍍層的品質和功能，往往因為存在著微小缺陷而不能提升到一定的要求。電鍍過程是一種極為複雜的電化學反應，在電解液中各種氧化還原反應同時發生並互相競爭，到目前為止仍然沒有一種儀器能有效觀測電解液中所有發生的反應，即使是電化學家也僅能依據事後的產物以化學式來描繪電鍍時所發生的事件。一般認為鍍層中微觀缺陷其所以形成，與電鍍過程中所產生的氣泡有密切關係。數十年來，許多研究人員雖然鍥而不捨的探索這個問題，但是由於缺乏適當的觀察研究工具，對於這些氣泡到底是如何形成、形成以後又是如何影響電鍍金屬的成長，一直沒有得到確切的答案。因此只能利用經驗法則，開發各種電鍍配方，以

抑制氣泡的形成，或是降低金屬缺陷形成的機率。然而以高解析度的 X 光顯微術進行即時觀察，可以獲得電鍍各個階段的珍貴資訊。圖一為在鋅的電鍍過程中，氫離子與金屬離子在陰極表面同時被還原，而導致金屬建構在氫氣泡表面的奇特現象，此為世界首度發現，依此可解釋在電鍍層中形成空孔缺陷的原因。

此外，電鍍為一種動態過程，絕大多數的參數，諸如離子濃度、電解液電阻值及所施加的電壓電流等，都處於非平衡狀態。尤其當施加電壓電流的那一瞬間，溶液中的離子會受電場吸引而產生離子空乏區，造成溶液的濃度變化。圖二為施加電流分別為 10、



圖一：在鋅的電鍍過程中，氫離子與金屬離子在陰極表面同時被還原，而導致金屬建構在氫氣泡表面的奇特現象，依此可解釋在電鍍層中形成空孔缺陷的原因。



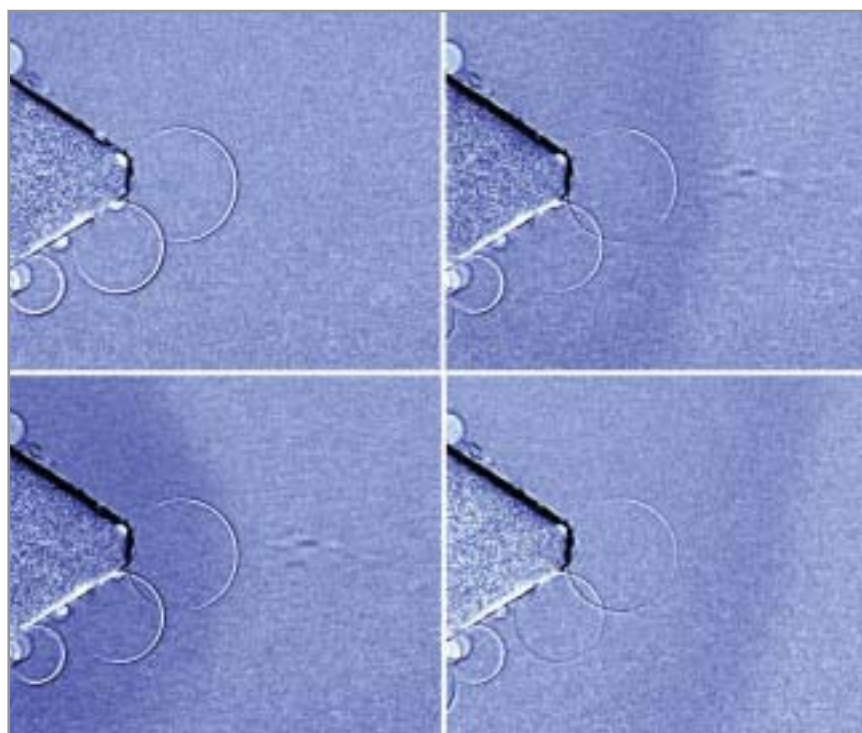
圖二：施加電流分別為 10, 20, 50, 80mA 時在陰極前緣所觀察到的離子濃度變化，其中亮帶的亮度與分佈反映出離子空乏區的範圍隨施加電流密度的增加而成等比級數增加。

20、50 及 80mA 時在陰極前緣所觀察到的離子濃度變化，其中亮帶的亮度與分佈反映出離子空乏區的範圍隨施加電流密度的增加而成等比級數增加。此現象雖已廣為電化學家所認同，但以影像技術獲得直接證據則是首次。而相對於陰極前緣所觀察到的離子空乏現象，在陽極前緣則可觀察到相反的反應，亦即金屬原子被離子化後釋放至電鍍液中。圖三為在電極前緣攝得之連續影像，在電極前緣出現的暗帶顯示在施加電壓的那一瞬間造成的急速金屬離子濃度增加。

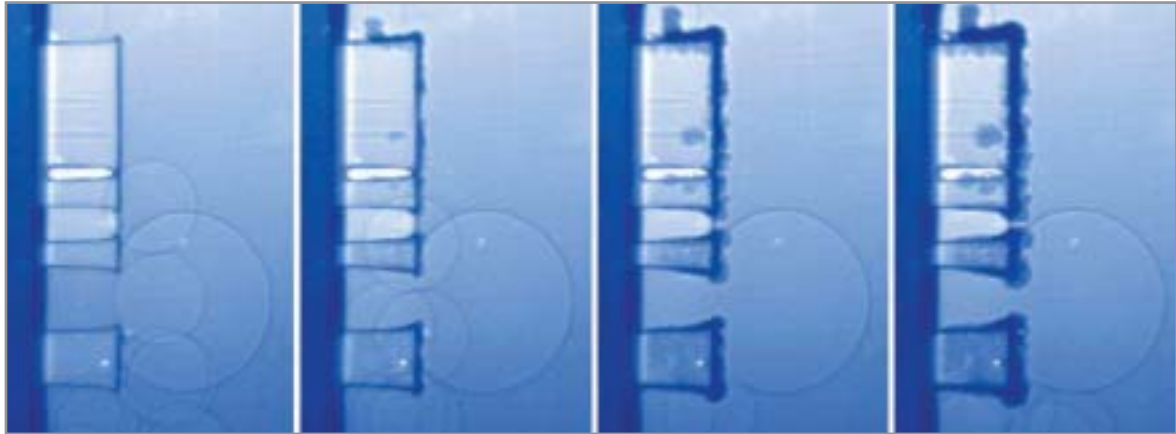
在半導體及微機電製程中可能發生的問題，亦可藉由適當的實

驗設計來加以模擬。圖四為利用高解析度 X 光顯微術觀察微米級模具上電鍍銅層的過程，顯示在基材轉折的區域具有較高點流密度，而導致鍍層的不均勻。利用這種方式監視動態過程，除了可以直接捕捉最佳的電鍍條件，大幅節省製程開發的時間外，甚至可以利用發現到的金屬材料直接成長在氫氣氣泡表面的現象，開發出新的材料和製造技術。

這些成果雖然是只是在本技術之「萌芽」期間所完成，但是根據我們對此技術之優越性之信心，未來之應用將更廣泛。我們目前合作對象包括了在材料、生物及醫學不同領域之專業研究群，在過去一年多之密集合作下，仍然取得了數項值得一提



圖三：在電極前緣攝得之連續影像，在電極前緣出現的暗帶顯示在施加電壓的那一瞬間造成的急速金屬離子濃度增加。



圖四：利用高解析度X光顯微術觀察微米級模具上電鍍銅層的過程，顯示在基材轉折的區域具有較高點流密度，而導致鍍層的不均勻。

之研究成果。這些成果包括我們成功地觀察到活體動物內部循環、消化等器官動態影像。我們亦成功地證實了不需顯影劑 (contrast agent) 之微心臟血管造影術，而利用相對比技術也可以使 X 光照相和斷層掃描所使用的輻射劑量大幅降低。這項成果乃 X 光光源強度、準直性及影像擷取設備解析度利用相對比原理之完美匹配之結果。

評審簡評：

得獎人與其國際合作團隊利用物體邊緣之折射效應，以白光及簡易的同步輻射光束裝置來得到高解析度及高對比之顯微影像，

頗具創意。此 X-光顯微攝影術未來將在生物、醫學與材料科學研究上廣泛地被採用，影響深遠。

其得獎作品 "Building on Bubbles in Metal Electrodeposition" 是刊在於 Nature 雜誌的一篇有關金屬電鍍過程的報導。作者利用 X-光顯微攝影術觀測到：電鍍時金屬可以附著在微小的氣泡表面上長成樹枝狀的結構，並清楚地記錄下電鍍過程中氣泡與金屬結晶核的互動關係。此作品不但回答了一個長久以來困惑電鍍研究工作者的問題，也為這項新型的 X-光顯微攝影術提供了一個良好的案例。