

# 掃描式電阻式顯微鏡在 IC 產業的應用

## Application of Scanning Spreading Resistance Microscope for IC Industry

殷開明、金書正

KaiMin Yin, Shu-Cheng Chin

二次離子質譜儀大量應用於 IC 產業在離子佈植的調控，因為它具備了很好的空間解析度與大範圍濃度分析，但是它只能提供一維空間的訊息。所以如何觀察電晶體矽基材中二維空間的載子分布是非常重要的，而掃描擴展式電阻顯微術是目前最具此能力的分析工具，因為它具備了高分辨二維空間解析度與大範圍的載子濃度分布兩大優點。在本篇文章中將會討論掃描式電阻式顯微鏡的工作原理以及為何它可以提供小於 1 奈米的空間解析度訊息，同時也介紹目前此技術在全球的最新應用。

Although secondary ion mass spectrometry (SIMS) analysis provide good spatial resolution and wide dynamic range for IC industry on implantation engineering control, but it is only for 1D information. To observe high performance of 2D junction profiling of transistors is very important. Scanning spreading resistance microscopy (SSRM) has been shown to be the most promising candidate to provide the high resolution 2D carrier distributions and wide range of carrier concentrations. In this paper, the authors give the explanations about the principle of SSRM and why it can provide  $< 1$  nm high spatial resolution information; meanwhile, we also introduce the most up to date of SSRM development in worldwide.

### 一、前言

當大型積體電路元件越作越小，如何得到二維空間離子佈植的方法，進而探討與元件電性關聯性非常重要。通常分析方法需具備下列幾項特點：第一是高空間解析度、第二是高靈敏的載子濃度分布、第三則是可量化的手法。綜觀目前相關的發展技術，如表 1 所列，如掃描穿隧顯微鏡 (scanning tunneling microscope) 雖然具備了高空

間解析度的優點<sup>(1)</sup>，但是如何製備出無污染的電子元件橫截面是相當困難的。而掃描電容式顯微鏡 (scanning capacitance microscope) 則具備了高靈敏的載子濃度與  $n-p$  型式離子區分等優點<sup>(2)</sup>，但因為先天掃描探針的電容散逸效應 (stray capacitance) 使空間解析度大打折扣，使得如何得到淺接面載子濃度的分布相當困難。

另外在電子顯微成像技術的蝕刻方法 (wet stain)<sup>(3)</sup> 與全像法 (holography)<sup>(4)</sup>，都因試片製備

表 1. 世界各研究單位對二維空間離子佈植相關的研究發展方法，分別以最重要三個指標列出各分析手法的差異性。

	SSRM	SCM	STM	EH	Atom probe
Spatial resolution	~1 nm*	> 10 nm	~1 nm	< 10 nm	< 1 nm
Dynamic range	$1 \times 10^{15} - 1 \times 10^{20}$	$1 \times 10^{15} - 1 \times 10^{20}$	$1 \times 10^{17} - 1 \times 10^{20}$	$1 \times 10^{17} - 1 \times 10^{20}$	$1 \times 10^{18} - 1 \times 10^{20}$
Quantification	Yes	Limited	Limited	Limited	Yes
Worldwide	IMEC/Toshiba	IMEC	Fujitsu	IBM	IBM

的困難度和試片應力效應或其他因素所造成的干擾，使資料解讀相當困難。反之掃描式電阻式顯微鏡則具備上述的優點<sup>(5-7)</sup>；小於 1 奈米的解析度、 $1 \times 10^{15} - 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  的大範圍濃度分布和可定量的標準手法，成為最適於分析二維空間載子濃度的方法。接下來本文會詳細介紹其原理與分析手法應注意的事項。

## 二、原理與試片製備方法

所謂的掃描擴展式電阻顯微術是利用掃描導電式探針去接觸一個欲分析的樣品，如圖 1 所示，而整個串流迴路需在電路導通的情形下量測樣品中的散布電阻，可以想像在矽基材上所摻雜的材料會因為濃度的不同而反應出不同的電阻，進而得到二維空間的分布情形。通常掃描導電式探針是採用摻雜硼元素的鑽石探針，兼具導電與耐磨特性。基本原

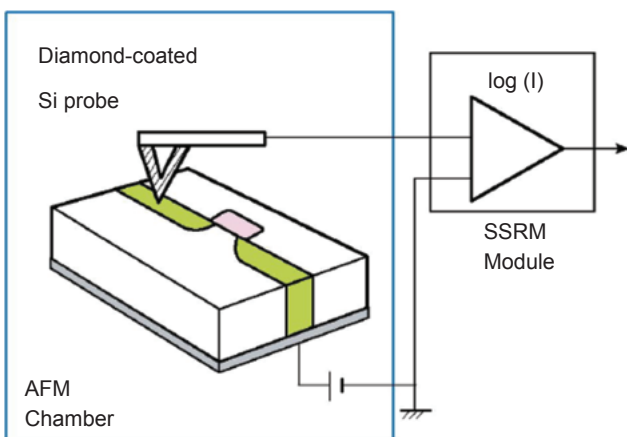


圖 1. 掃描擴展電阻式顯微鏡的簡單示意圖。主要是利用鑽石導電探針掃描樣品表面，樣品與分析工具必須形成一個串流回路<sup>(9)</sup>。

理雖然簡單，但是如何得到奈米的空間解析度和穩定與再現性高的資料，卻不是一件容易事情。一般而言，掃描擴展式電阻顯微術需要施加比傳統接觸式原子力顯微術 (~10 nN) 更大的垂直正向力，如此大的正向力對於影像解析度的提升是一個很艱鉅的挑戰。然而，掃描擴展式電阻顯微術仍能夠達到接近 1 奈米的影像解析度，在下面章節有詳細討論。

Hantschel 等人於 2000 年於應用物理快報 (Applied Physics Letters) 發表的文獻中提到<sup>(5)</sup>，使用單晶鑽石探針能將掃描擴展式電阻顯微術解析度大幅提升，提升的方式很直觀，就是直接減少探針尖端的半徑；換句話說，就是增加探針的尖銳度，愈尖的探針愈能得到愈好的解析度。圖 2 為兩種鑽石探針的掃描式電子顯微術照片 (SEM)。圖 2(a) 為一般市面上販售之多晶鑽石鍍式探針，針尖直徑大約 200 奈米；此種碳針的缺點為無法確定單一接觸點 (single asperity)，多晶鑽石顆粒鍍膜於高摻雜之矽探針表面，在大正向力的作用下，常常接觸點不只一個而使得影像有雙重針尖效應 (double tip effect)。另一方面，鈍的針尖幾乎不可能得到接近 1 奈米之解析度。

互相比較之下，圖 2(b) 為單晶鑽石探針，此探針的特點為針尖全部由同位置成長 (*in situ* growth) 之單晶鑽石，針尖直徑大約為 15–20 奈米。相比於多晶鑽石鍍膜式，針尖直徑大幅改善，且整個針尖部分是一個很單純的倒金字塔形結構，硬度更甚於多晶鑽石，更能夠承受掃描擴展式電阻顯微術之巨大正向力。更好的是，如此理想針形之探針可以確保單一接觸點。

但是，15–20 奈米的探針直徑似乎仍然無法達到一奈米之解析度，跨越其間的差異是利用原本

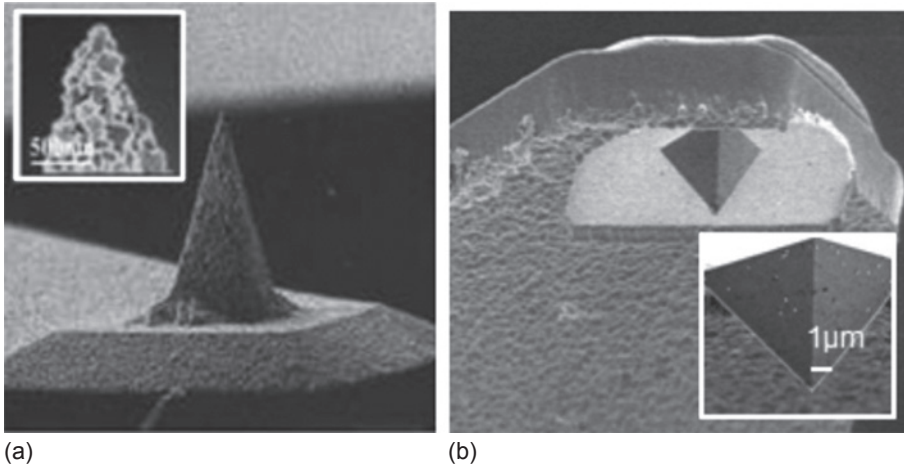


圖 2. 掃描擴展電阻式顯微術專用鑽石探針之 SEM 影像。(a) 為一般市面販售之多晶鑽石鍍膜探針，(b) 為 IMEC 自行開發之單晶全鑽石探針，針尖形狀之優劣可清楚明辨<sup>(5)</sup>。

掃描擴展式電阻顯微術所需大的正向作用力達成。圖 3 為一單晶鑽石探針於使用前 (左圖) 與使用後 (右圖) 所拍攝之穿透式電子顯微術影像 (TEM)<sup>(6)</sup>。使用之後，我們可以觀察到針尖在經過表面刮掃後，自我修剪成一個更尖的尖端 ( $\leq 5$  nm)，如此影像解析度可更進一步提升。但是這離 1 奈米空間解析度要求仍有一段差距。而為何單晶鑽石探針如何達到此需求，則由下述觀點來說明。

圖 4 為一組有限元素法模擬圖，顯示矽晶格產生形變後的相變化<sup>(6)</sup>。單晶矽晶體本身為簡單立方之鑽石結構，但受到壓力產生形變之後會發生相變化，尤其是掃描擴展式電阻顯微術在擷取影像時，探針施加於局部區域的表面刮掃時的壓力常常達到  $\sim$ GPa 的數量級，在這樣大的壓力下，矽晶體會過渡至 Si-II 與 BCT5-Si 兩種高壓相，Si-II 即所謂的  $\beta$ -tin Si，混成軌域為  $sp^3d^2$ ，BCT5-Si 則是具有  $sp^3d^1$  的混成軌域。這兩種結構簡單說來即為一個矽原子週圍與六個矽原子形成共價鍵 (Si-II)，而另

一種則與五個矽原子形成共價鍵 (BCT5-Si)。此兩種矽晶相於外圍價電子有  $d$  軌域參與鍵結，與過渡金屬之性質類似，這即是說，在探針與樣品作用的局部區域，其矽晶體的局部表現接近金屬的特性，意即局部區域有相對於其他區域之低電阻。

圖 4 顯示出三種不同的針尖半徑在高壓下與矽晶體作用所產生的相變化分布圖。當半徑縮小至 2.1 奈米時，所產生之局部形變而有相對低電阻之體積為一立方奈米左右，當電流流至探針與樣品作用區域時，即使針尖有 2.1 奈米半徑的圓形面積接觸，但大部分電流會選擇流經一奈米立方之低電阻區域，此種現象等效成一個一奈米直徑的虛擬針尖 (virtual tip) 於樣品表面掃描，進而達到一奈米之解析度。

其他文獻指出，摻雜後的矽晶體於高壓力下更能增強鑽石結構過渡至高壓相的效應<sup>(7)</sup>，這即是說，我們可以用更小的正向力在摻雜後的矽晶體達到虛擬針尖的效果，使得掃描擴展式電阻顯微術可

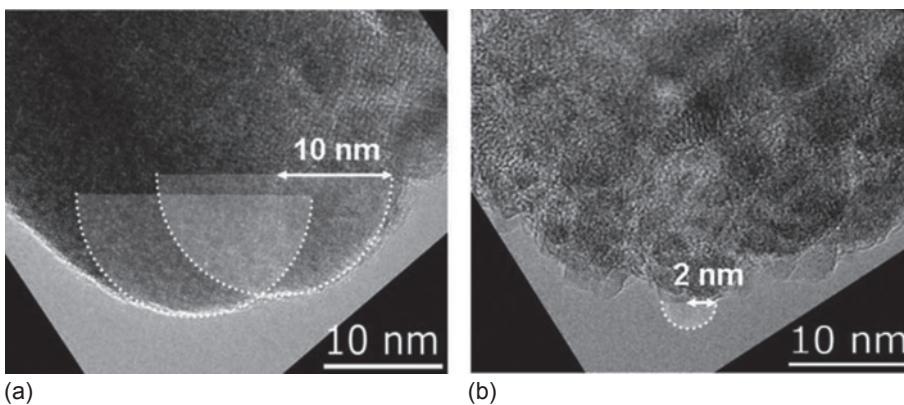


圖 3. (a) 單晶全鑽石探針使用前與 (b) 使用後之穿透式電子顯微術影像<sup>(6)</sup>。

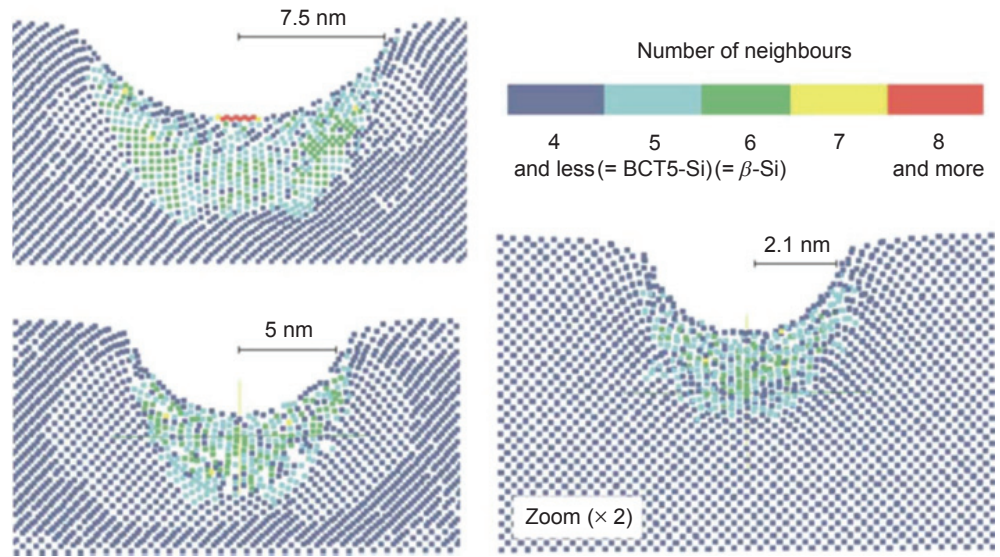


圖 4. 有限元素法模擬不同的針尖半徑在高壓下與矽晶體作用所產生的相變化分布圖<sup>(6)</sup>。

以獲得高解析度的二維載子濃度分布圖。這是優點也是缺點，前段提及的高壓相變化需要極大的局部應力，此局部應力的能量會隨著針尖離開而釋放至矽晶體中將局部的矽單晶破壞而成非晶矽，這即是說掃描擴展式電阻顯微術在擷取影像時不斷破壞原本樣品的表面，使得資料重製性面臨極大的考驗。

上述論點指出了此技術探針的重要性以及探針與樣品表面的交互作用，另一個重點鮮少有人仔細討論，那就是樣品的製備方法，就筆者在發展此技術的心得，如何做出一個高品質的分析樣品才是重要關鍵。先從樣品的表面分析需要注意三個重點來詳加探討：第一是表面的平整度，第二是表面的潔淨度，第三是欲分析樣品位置的精準度。

一般來說，樣品表面加工也分成三個不同方法。第一是劈裂法，此方法是利用矽晶體的結構特性，我們可以沿著矽單晶的 (1 1 0) 晶面劈裂出原子級的平面，但是劈裂的準確度 ( $\sim \pm 0.3 \mu\text{m}$ ) 和只限 (1 1 0) 晶面的特性限制某些樣品需求。第二個方法是機械研磨，雖然此方法相較於劈裂法有較高的定位準確度，但是表面的潔淨度與細拋後所殘留的表面破壞層卻影響資料的準確性。第三個方法，聚焦離子束方法 (focus ion beam)，雖然此方法具有極佳定位準確度，但是它是由鎵 (Ga) 離子束去切削，會有殘留鎵元素分布在樣品表面，由於其外圍電子軌域是五價電子，所以會影響資料的判讀，另外如何整合成可以用探針掃描的樣品也不是一件

容易的事。除了樣品表面的需求，如何做好樣品背面的接觸電阻也是一大挑戰，通常都是由聚焦離子束來加工，如何做到低電阻的接觸界面，往往跟表面破壞層厚度與所鍍金屬材料選擇有決定性影響。

得知一個好的導電鑽石探針和樣品的製備方法，還有一個重要因素影響資料的精確性，那就是在真空系統下去掃描樣品，由 Li Zhang 於 2006 所發表的研究有了重大突破<sup>(8, 9)</sup>，他把掃描系統置於真空中 ( $< 1 \times 10^{-5}$  Torr) 取擷取資料，解析度與訊噪比有了明顯的改進。圖 5 為樣品同一區域分別在真空中、大氣下、再回到真空中所得到的影像，可以明顯比較在真空中的影像優於在大氣中。關於此真空效應所扮演的機制，研究報告指出在真空中樣品表面沒有吸附大氣中的水氣，因而有較低的接觸電阻。針對此論述筆者有另外心得分享，因為在大氣中去掃描樣品表面，在如此細小針尖下所產生的電場是非常巨大的，這可能會加速矽基材表面氧化速率而影響掃描資料的讀取，也會造成較差的空間解析度。

### 三、目前最新應用與發展

2012 年 32/28 奈米世代之電子產品相繼問世，在這樣窄的線寬之下，輕摻雜汲極 (light-doped drain, LDD) 已是一道關於元件特性的關鍵製程，元件工程師到了奈米世代非常急於知悉位於閘

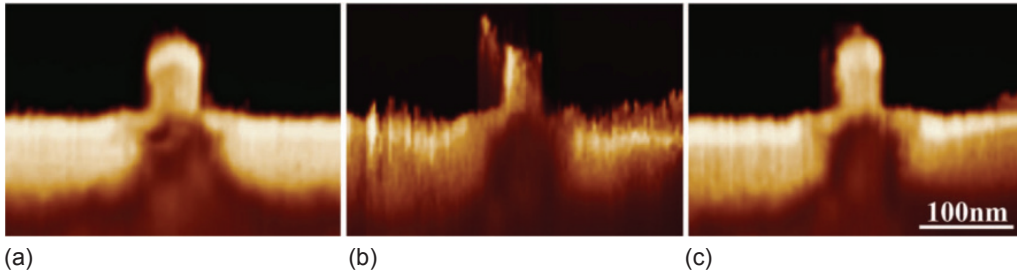


圖 5. SSRM 量測在 (a) 真空中，(b) 大氣中，(c) 再放入真空中之結果，量測試片為 n-type MOSFET 經過退火之試片<sup>(8)</sup>。

極之下 LDD 的分布情形，LDD 彼此之間的距離與臨界電壓 (threshold voltage,  $V_t$ )、 $I_{on}/I_{off}$  有著密不可分的關係；對於製程工程師的挑戰，則是源極汲極間的導通。而製程上控制的首要之務便是先確立量測的工具，以實際量測的資料做製程最佳化，且量測解析度能夠分辨其差異性，在此前提之下，似乎鮮少技術可以達到這樣的標準。

Eyben 等人於 2012 年初所發表的期刊論文<sup>(11)</sup>，其內容主要探討不同離子佈植的條件下，LDD 於閘極之下的間距的關係。將分為三個不同的參數做比較，分別為離子佈植之傾斜角度、離子佈植之能量、與快閃熱退火 (flash anneal) 的溫度。

圖 6 為四個具有不同 LDD 條件 PMOS 元件之掃描擴展式電阻顯微術影像，這些影像在擷取之後以 IMEC 長期發展的量化軟體描繪出氧化物與閘極的邊界，將邊界外的摻雜矽阻值作圖，此步驟可降低影像處理過程中，對於閘極與氧化物的電阻會造成計算上誤判的可能性。很明顯地，離子佈植能量愈高使得 LDD 在熱退火之後擴散至閘極之下的長度愈長；而離子佈植時的傾斜角度也同樣的能延伸 LDD 擴散長度；最後，熱退火的溫度愈高則 LDD 的擴散長度愈長。這篇論文所呈現出來的結果，證明了掃描擴展式電阻顯微術仍有能力在 32/28 奈米世代對於元件分析提供一個很明確的實驗數據，而掃描擴展式電阻顯微術在二維摻雜量測上仍是最可靠的工具。

當元件尺寸持續縮小，對二維平面的元件結構而言，通道縮減以致於受到源極汲極的偏壓影響會相對變嚴重，因此促成了立體的元件結構，也就是俗稱的鰭式場效電晶體 (FinFET) 的發明。鰭式電晶體因為結構緻密且線寬更小，目前掃描擴展電阻式顯微術的樣品製備技術尚未開發出在鰭式基板觀測閘極之下 LDD 的分布情況。然而目前的技術仍

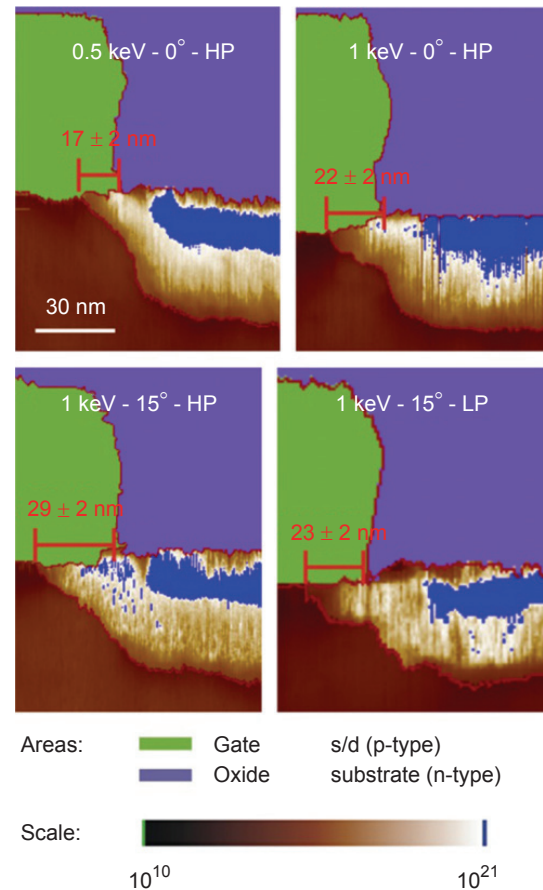
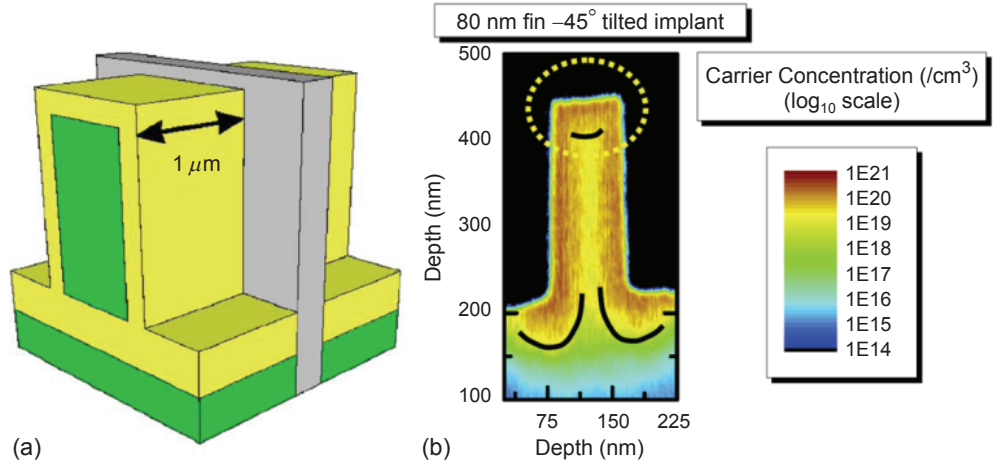


圖 6. PMOS 元件之 SSRM 影像，LDD 條件為 0.5 keV、tilt = 0°、high power = 1350 °C，1 keV、tilt = 0°、high power = 1350 °C，1 keV、tilt = 15°、high power = 1350 °C 及 1 keV、tilt = 15°、low power = 1200 °C<sup>(11)</sup>。

可針對基板本身摻雜濃度做量測<sup>(12)</sup>，圖 7(a) 為鰭式電晶體的樣品製備示意圖，在垂直鰭式基板的方向上可以觀測的載子濃度分布如圖 7(b) 所示，右圖中可以清楚看到載子濃度的立體分布情形。現階段而言，鰭式電晶源極汲極的摻雜與傳統平面式電晶體技術上有許多不同之處，直觀上，至少鰭式摻

圖 7.

(a) 鳍式電晶體樣品製備的示意圖，(b) 現階段掃描擴展電阻式顯微術可以觀察在鳍式基板三個平面上載子濃度的分布情形<sup>(12)</sup>。



雜為立體的，因此摻雜的控制上將複雜許多，掃描擴展電阻式顯微術仍然可以幫助了解摻雜的分布情形，以進一步探討不同的摻雜條件對三個平面的摻雜分布的影響程度。

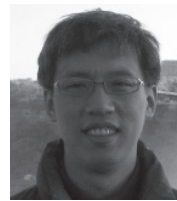
#### 四、結論

掃描擴展式電阻顯微術對先進元件的分析仍可扮演非常重要的角色，而以筆者的經驗，發展此技術往往遇到的瓶頸不是探針與機台的問題，如何製備一個低背面接觸電阻和乾淨的樣品表面才是關鍵技術，一旦解決此問題通常都可以得到正確和可靠的資料給研發單位一個明確的改善方向。

#### 參考文獻

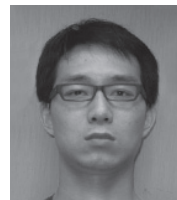
1. H. Fukutome, H. Arimoto, S. Hasegawa, and H. Nakashima, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **22** (1), 358, Jan/Feb (2004).
2. 張茂男, 陳志遠, 潘扶民, 科儀新知, **22**(5), 67 (2001).
3. N. Ikarashi, T. Ikezawa, K. Uejima, T. Fukai, M. Miyamura, A. Toda, and M. Hane, *J. Appl. Phys.*, **103**, 114514 (2008).
4. T. S. Back, J. M. Yang, T. S. Park, H. J. Kim, S. Y. Lee, S. C. Lee, and J. H. Choi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39**, 3330 (2000).
5. T. Hantschel, P. Niedermann, T. Trenkler, and W. Vandervorst, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 1603 (2000).
6. P. Eyben, F. Clemente, K. Vanstreels, G. Pourtois, T. Clarysse, E. Duriau, T. Hantschel, K. Sankaran, J. Mody, and W. Vandervorst, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **28**, 401 (2010).
7. K. Mylvaganam, L. C. Zhang, P. Eyben, J. Mody, and W. Vandervorst, *Nanotechnology*, **20**, 305705 (2009).
8. L. Zhang, K. Ohuchi, K. Adachi, K. Ishimaru, M. Takayanagi, and A. Nishiyama, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 192103 (2007).
9. L. Zhang, K. Ohuchi, K. Adachi, K. Ishimaru, M. Takayanagi, and N. Fukushima, *IEEE 108* (2006).

10. X. Q. Yan, X. M. Huang, S. Uda, and M. W. Chen, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 191911 (2005).
11. P. Eyben, T. Clarysse, J. Mody, A. Nazir, A. Schulze, T. Hantschel, and W. Vandervorst, *Solid-state Electronics*, **71**, 69 (2012).
12. J. Mody, A. K. Kambham, G. Zschatzsch, P. Schatzer, T. Chiarella, N. Collaert, L. Witters, M. Jurczak, N. Horiguchi, M. Gilbert, P. Eyben, S. Kolling, A. Schulze, T. Y. Hoffmann, and W. Vandervorst, *Symp. VLSI Technol. Dig.*, 195 (2010).



殷開明先生為清華大學工程與系統科學博士，現任台灣積體電路製造股份有限公司故障分析處穿透式電鏡部經理。

KaiMin Yin received his Ph.D. in engineering of system science from National Tsing Hua University. He is currently a manager in Transmission Electron Microscopy Department of Failure Analysis Division of Taiwan Semiconductor Manufacturing Company, Ltd.



金書正先生為台灣大學光電工程研究所碩士，現任台灣積體電路製造股份有限公司故障分析處穿透式電鏡三課工程師。

Shu-Cheng Chin received his M.S. in photonic and optoelectronic from National Taiwan University. He is current an engineer in Transmission Electron Microscopy Section 3 of Failure Analysis Division of Taiwan Semiconductor Manufacturing Company, Ltd.