

第三章 矽晶片背面掃瞄之考量與討論

3-1. 簡介

在第二章前半部，我們已經介紹了基本的掃瞄架設，並在實驗上得到良好的矽晶片正面成像。但實際上正面結構無助於對晶片真正電路的檢測，故接下來不對正面成像多做討論。而在第二章後半部裡，我們則透過計算及模擬軟體的輔助下，確認了各元件的架設位置、角度等。然而在實際掃瞄過程中，則有更多因素需要考慮。因此在本章節裡，我們要進一步針對實驗過程中所遭遇的各種困難提出來，並加以討論分析。

首先，我們針對晶片矽基板對成像的干擾進行分析。一般而言，顯微鏡所用之蓋玻片為厚度 0.18 mm 之玻璃薄片，但對矽晶片背面掃瞄而言，則如同有一層 0.4 至 0.7mm 厚，且折射係數極大之蓋玻片阻礙了電路結構成像。其阻礙機制包括介質界面反射、基板內部的全反射，以及物鏡工作距離不足等問題。為了解決這些問題，我們利用傳統的介質耦合的方式來改進。而接下來後半部，我們將考量各種雜訊對掃瞄訊號的干擾。一般而言，背面掃瞄的訊號極小，故我們提出幾種可能影響成像之雜訊，並且設法找出有效且簡單的改良方法以降低雜訊干擾。而最後，我們會將經過改良的掃瞄系統應用在熱影像偵測上，以驗證光學掃瞄系統在矽晶片缺陷檢測上的可行性。

3-2. 油鏡(Oil Lens)分析

一般而言，油鏡的功能主要有三點：

- 增加顯微鏡之數值孔徑以提高解析度
- 降低界面反射
- 增加物鏡有效工作距離

其中數值孔徑主要是針對傳統顯微鏡成像的改良，其關係式為：

$$NA. = n' \sin \theta , \quad (3-1)$$

式中， n' 為物鏡與樣品之間的介質折射係數； θ 為對焦時，反射訊號可入射物鏡之最大半張角。

由於增加數值孔徑主要是改良顯微鏡成像時的解析度，與掃瞄系統無直接關係，故接下來我們僅針對界面反射及工作距離來加以討論。

3-2-1. 降低界面反射

當一束光照射到不同透光介質界面時，部分光能會發生鏡面反射而降低透射比例。對垂直入射光而言，以玻璃與空氣為例，其反射率公式如下[1]：

$$R_{ga} = \frac{(n_{glass} - n_{air})^2}{(n_{glass} + n_{air})^2} \quad (3-2)$$

其中玻璃(Borosilicate, BK7) 折射係數為 1.52，空氣為 1，則可得到光強度的反射比例為：

$$R_{ga} = 0.04258 ,$$

若以對數形式表示，則可寫成：

$$RL (dB) = - 10 \log_{10} (R) = 13.71 dB ,$$

其中 RL 稱為反射損失(Return Loss)，單位分貝。由上述定義可知，若反射損失的值愈大，光反射比例就愈小。

對矽晶片掃瞄而言，我們的界面反射主要來自於矽與空氣界面，若將(3-2)式中的 n_{glass} 以矽($n_{si} = 3.42$)取代，可得到：

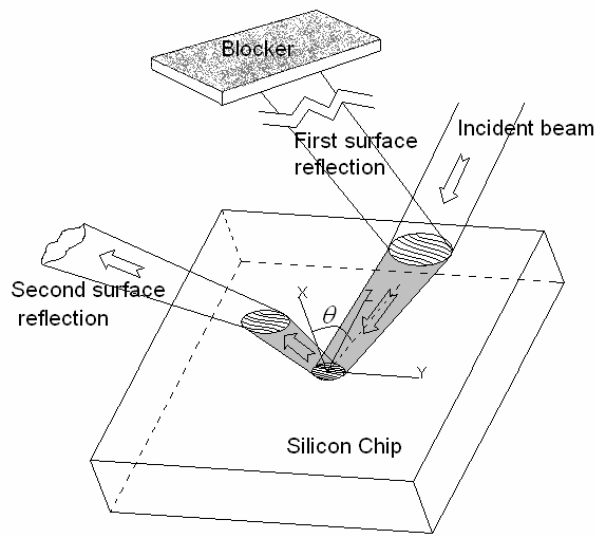
$$R = 0.2997$$

或

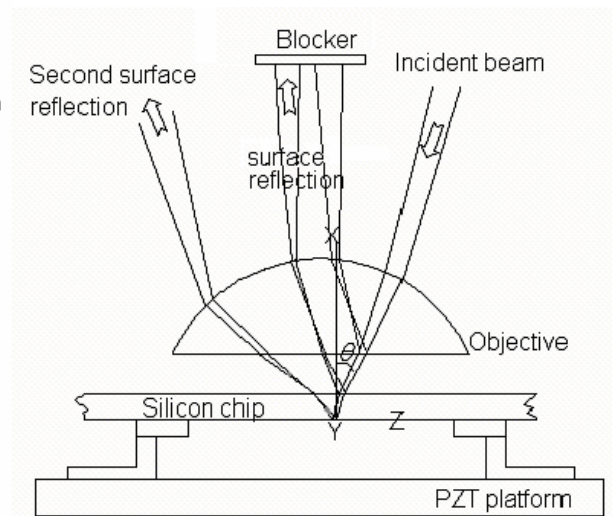
$$RL(dB) = 5.23dB ,$$

我們發現，矽與空氣間的反射損失值很小，這意味著對於矽晶片掃瞄而言，光的表面反射的干擾對訊號是不可忽略。除此之外，在做光探針掃瞄時，由於光的入射角有微量不同，但這些微量的角度偏差便會造部分反射訊號會摻入界面反射光，部分訊號則無(如圖 3-1 所示)。而這樣的情形將會大幅抬升訊號之最大值，進而降低影像的對比值。

由圖 3-1(a)可知，雖然界面反射訊號可置入阻隔物隔除，但掃瞄過程中，界面反射與結構訊號相當靠近且同時擺動，因此我們很難以靜態阻隔物將界面反射完全隔除。因此，在無法有效排除界面反射的情況下，我們可利用折射係數耦合油(Refractive Index Matching Oil)降低界面反射的干擾。

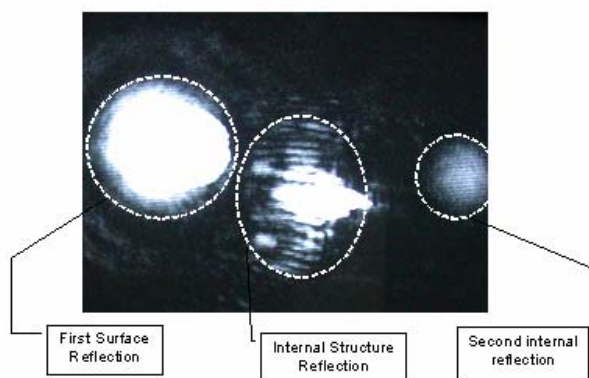


(b) 空氣與矽基板之反射機制俯視圖。



(a) 物鏡、空氣及矽基板反射示意圖。若加入耦合油滴，則圖中物鏡與空氣之反射光則能被消除。

圖 3-1 光入射基板之反射示意圖



(a) (油鏡)光入射矽基板之反射光點，由左至右分別為表面反射、內部結構反射，以及 CCD 鏡頭反射。



(b) (油鏡)顯微鏡模式觀察到之表面及內部結構反射光點。

圖 3-2 不同反射光點之比較

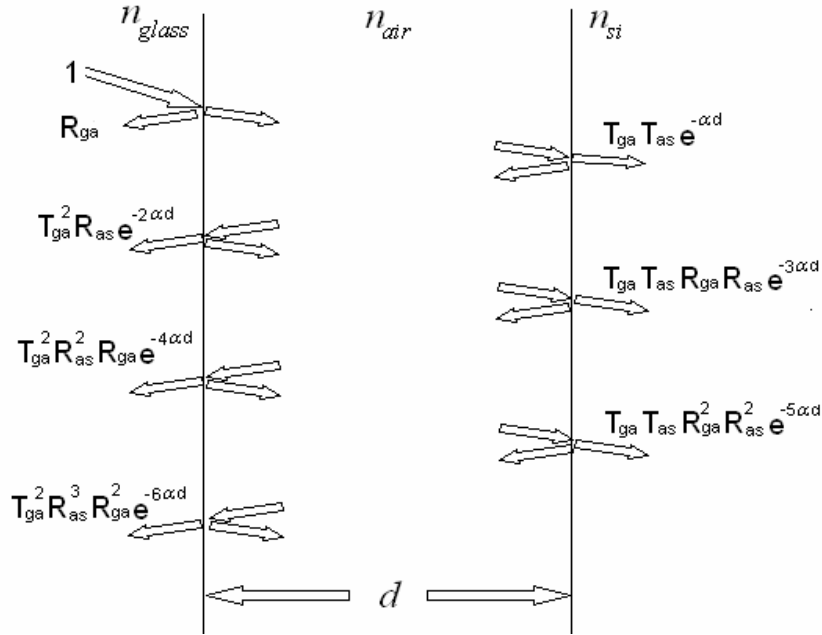


圖 3-3 三層介質界面之反、透射示意圖

接下來我們計算多層介質的界面反射情況為何。圖 3-3 為三層介質 (玻璃、空氣及矽基板) 的界面的多重反、透射示意圖，其中 R_{ga} ， T_{ga} 分別為玻璃與空氣的反射與透射比例； R_{as} ， T_{as} 為空氣與矽基板的反射與透射比例；而 α 為 1064nm 波長的紅外光在室溫時於夾層介質的衰減係數，在空氣中其值約為 0 cm^{-1} 。故由圖 3-3，我們可求得乾物鏡時的總反射比例為：

$$\begin{aligned}
 & R_{ga} + T_{ga}^2 R_{as} e^{-2\alpha d} + T_{ga}^2 R_{as}^2 R_{ga} e^{-4\alpha d} + T_{ga}^2 R_{as}^3 R_{ga}^2 e^{-6\alpha d} + \dots \\
 &= R_{ga} + T_{ga}^2 R_{as} e^{-2\alpha d} (1 + R_{as} R_{ga} e^{-2\alpha d} + R_{as}^2 R_{ga}^2 e^{-4\alpha d} + \dots) \\
 &= R_{ga} + T_{ga}^2 R_{as} e^{-2\alpha d} \frac{1}{1 - R_{as} R_{ga} e^{-2\alpha d}}
 \end{aligned} \tag{3-3}$$

假設入射角度很小，故 R_{ga} ， T_{ga} ， R_{as} ， T_{as} 皆以垂直入射計算之，則：

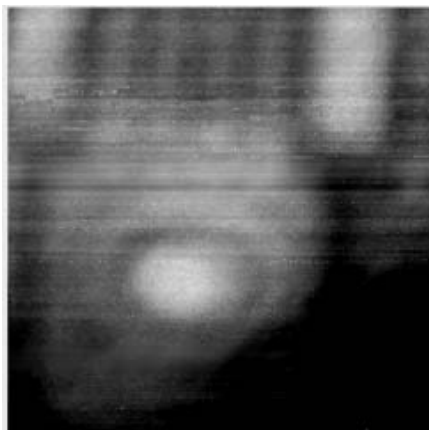
$$R_{ga} = \frac{(n_{glass} - n_{air})^2}{(n_{glass} + n_{air})^2},$$

$$T_{ga} = \left(1 - \frac{n_{glass} - n_{air}}{n_{glass} + n_{air}}\right)^2,$$

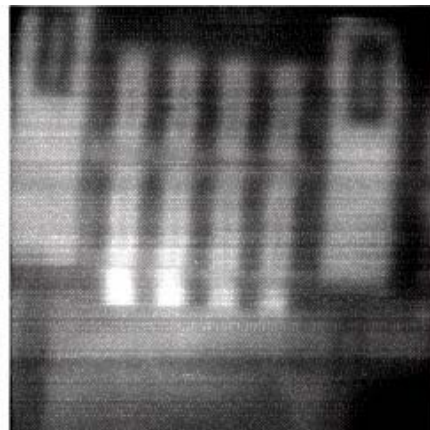
$$R_{as} = \frac{(n_{air} - n_{silicon})^2}{(n_{air} + n_{silicon})^2},$$

$$T_{as} = \left(1 - \frac{n_{air} - n_{silicon}}{n_{air} + n_{silicon}}\right)^2,$$

其中 $n_{air} = 1$ ， $n_{silicon} = 3.42$ ， $n_{glass} = 1.52$ ， $\alpha = 0 \text{ cm}^{-1}$ ， $d = 0.05 \text{ cm}$ 。故可得總反射率為 0.163。若以油滴取代空氣層，其折射係數約 1.52， $\alpha = 0.01 \text{ cm}^{-1}$ 。由於油滴與物鏡折射係數相同，可完全耦合，故僅剩下油層與矽基板的反射，於是代入(3-3)式後可求得反射率為 0.094，其值幾乎僅為乾物鏡的一半，故介質耦合可有效提升 RL 值。如圖 3-4 所示為加入油滴前後的 $0.18 \mu\text{m}$ 製程晶片背面掃描圖像，其油鏡不但解析度較高，則界面反射的干擾也較不明顯。



(a) 乾物鏡，部分區域因反射強度太大而降低圖像對比。



(b) 油鏡，其結構對比清晰

圖 3-4 加入油滴前後，界面反射對成像影響差異

3-2-2. 油鏡與工作距離

耦合油滴會影響的另一個成像參數是物鏡的工作距離(Working Distance)。工作距離的定義為在空氣中，物鏡端點至聚焦點間的距離，但假若在這段距離內有任何折射係數大於 1 的介質出現，則工作距離會因此延伸。已知矽基板本身是一種厚且折射係數高的介質，至於這樣的介質是否足夠使得工作距離延伸至我們所要觀測之結構？以及加入油滴後，對矽基板深度探測有何影響？這些都是我們這一節所要討論的主題。

首先我們將物鏡的聚光路徑簡化成一三角形(如圖 3-5 所示)，其中 D 為有效入射孔徑， f 為等效焦距， θ 為空氣中的聚焦張角，而 w 是物鏡的工作距離。我們將簡化後的物鏡圖形分別引入乾物鏡與油鏡的聚焦示意圖中(如圖 3-6 及 3-7 所示)，並計算加入耦合油滴後對聚焦位置的影響。

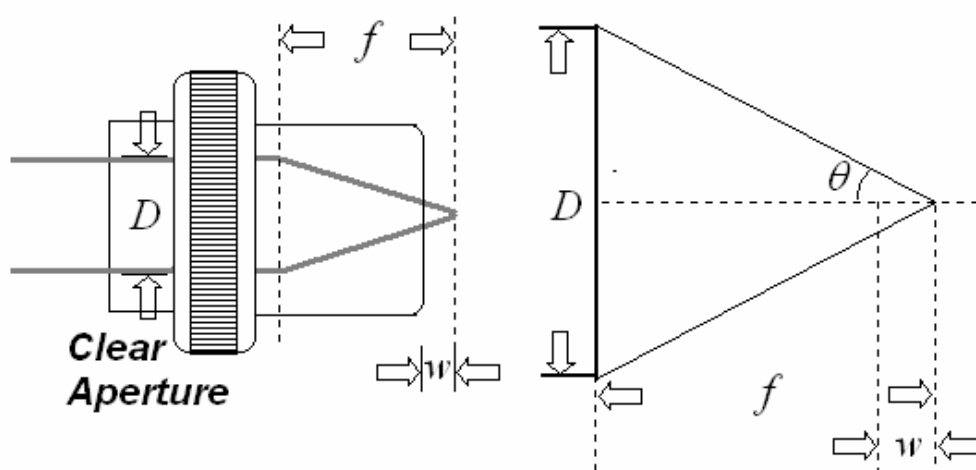


圖 3-5 物鏡簡化示意圖

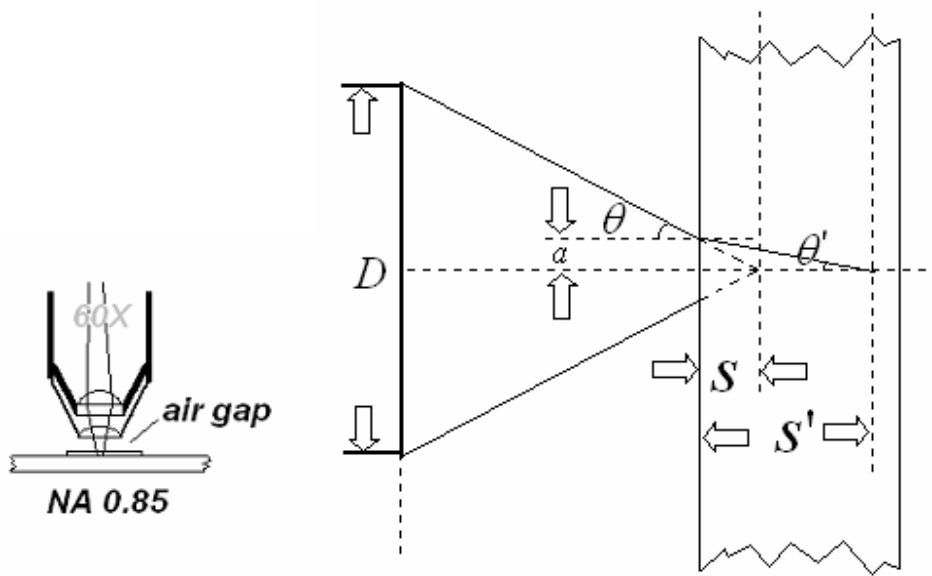


圖 3-6 工作距離與額外介質的影響

在圖 3-6 中， θ 及 θ' 分別是聚焦半張角在空氣及介質中的值； a 為光照在基板表面上之半寬長； S 為基板表面到原本聚焦點的距離； S' 為光探針深入基板內的距離。由圖中可得知加入基板後的等效工作距離為 $w - S + S'$ ，由於 $S' \geq S$ ，故其值不小於原工作距離。但要特別注意的是，第一，由工作距離的定義可知， S 必不大於原本之工作距離 w ；第二，聚焦的重點不在於工作距離的長短，而是能深入基板的深度 S' 為何。故接下來我們要求出 S' 與各個參數間的關係式。

首先由幾何關係得到：

$$S' = \frac{a}{\tan \theta'} = \frac{S \cdot \tan \theta}{\tan \theta'} ,$$

其中 $\theta = \tan^{-1}[D/2f]$ ，且由斯涅耳定理可得 $\theta' = \sin^{-1}[\sin \theta / n]$ ，代入上式後：

$$\begin{aligned}
S' &= \frac{SD}{2f \cdot \tan\theta} \\
&= \frac{SD}{2f \cdot \tan[\sin^{-1}[\frac{\sin\theta}{n}]]} \\
&= \frac{SD}{2f \cdot \tan[\sin^{-1}[\frac{\sin[\tan^{-1}[D/2f]]}{n}]]}。
\end{aligned}$$

定義新參數 S'' 為物鏡端點與基板距離，則 $S'' = w - S$ 。將 S'' 代入上式後可得到：

$$S' = \frac{(w - S'')D}{2f \cdot \tan[\sin^{-1}[\frac{\sin[\tan^{-1}[D/2f]]}{n}]]} \quad (3-4)$$

由(3-4)式發現， S' 值與 S 成正比關係，其餘皆為物鏡與基板性質。而 S 又受限於原工作距離，因此將實際規格(如表 3-1)代入式中後可得 $S' = 4.21S = 0.547 - 4.21S''$ ，且 $S \leq w$ ，故得 $S' \leq 0.547 \text{ mm}$ ，即聚焦深度最大不超過 $547\mu\text{m}$ ，此值發生於物鏡與基板完全貼靠一起時，矽晶片基板而言，尺寸約在 300 至 $700\mu\text{m}$ ，因此對較厚基板的晶片會難以成像。

倍率	焦 距 (mm)	有效入射孔 徑(mm)	工作距離(mm)	基 板 折 射係數	耦 合 油 折 射係數
60X	3.0	4.5	0.13	3.42	1.52

表 3-1 物鏡規格與材料折射係數

接下來我們討論加入耦合油滴後的情形，如圖 3-7 所示，其中我們重新定義幾個參數， a 是光照在油層上的半寬長，即物鏡的出射孔徑半

徑； a' 為光照在矽基板上的半寬長； S 為油層表面到原本聚焦點的距離，即原工作距離 w 。 S' 為光探針深入基板內的距離； S'' 是油層厚度；油滴的折射係數為 n_o ，而矽基板為 n_s 。

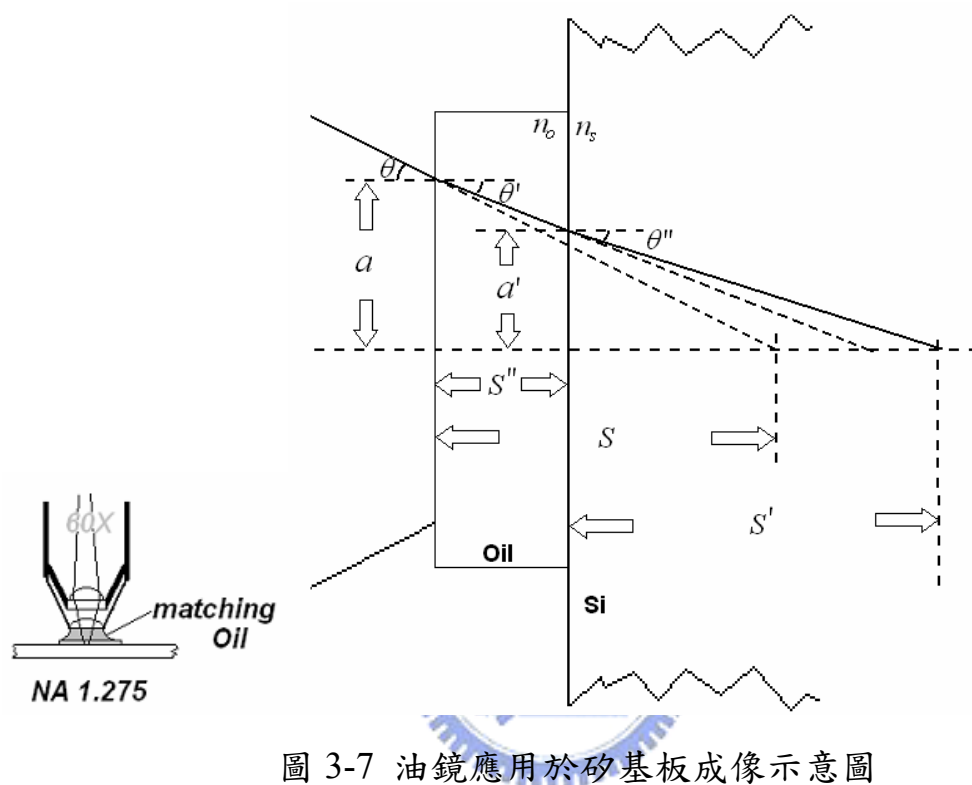


圖 3-7 油鏡應用於矽基板成像示意圖

由圖中可看出等效工作距離 $S''+S'$ ，而 S' 與 S'' 之間的關係可由以下推導得到：

由幾何關係可知

$$S' = \frac{a'}{\tan\theta''} ,$$

其中 $a' = a - S'' \cdot \tan\theta'$ $S = S \cdot \tan\theta - S'' \cdot \tan\theta'$ ，故

$$S' = \frac{S \cdot \tan\theta - S'' \cdot \tan\theta'}{\tan\theta''} . \tag{3-5}$$

其中 $S = w$ ， $\theta = \tan^{-1}[D/2f]$ ， $\theta' = \sin^{-1}[\sin\theta/n_0]$ ，且 $\theta'' = \sin^{-1}[\sin\theta/n_s]$ ，代入

(3-5)式後得到：

$$S' = \frac{w \cdot \frac{D}{2f} - S'' \cdot \tan[\sin^{-1}[\sin\theta/n_0]]}{\tan[\sin^{-1}[\sin\theta/n_s]]}$$

$$= \frac{w \cdot \frac{D}{2f} - S'' \cdot \tan[\sin^{-1}[\frac{\sin[\tan^{-1}[D/2f]]}{n_0}]]}{\tan[\sin^{-1}[\frac{\sin[\tan^{-1}[D/2f]]}{n_s}]]} \quad (3-6)$$

同樣，將表 3-1 代入上式後可得 $S' = 0.547 - 2.448S''$ ，與(3-4)式做比較可發現，其最大聚焦深度依然是 $547\mu\text{m}$ ，對厚基板探測沒有改善，但對 $500\mu\text{m}$ 左右的基板而言，由於式子中 S'' 前的係數縮小約兩倍，故物鏡與基板間可容忍的間距亦倍增。

由以上討論可得知，雖然耦合油滴對在基板聚焦深度沒有明顯的好處，但降低表面反射的優點已足以提升成像品質及解析度。至於要真正解決基板厚度的問題，我們可利用工作距離較長之特殊物鏡來取代傳統物鏡。圖 3-8 至 3-9 中是一系列背面成像的結果。

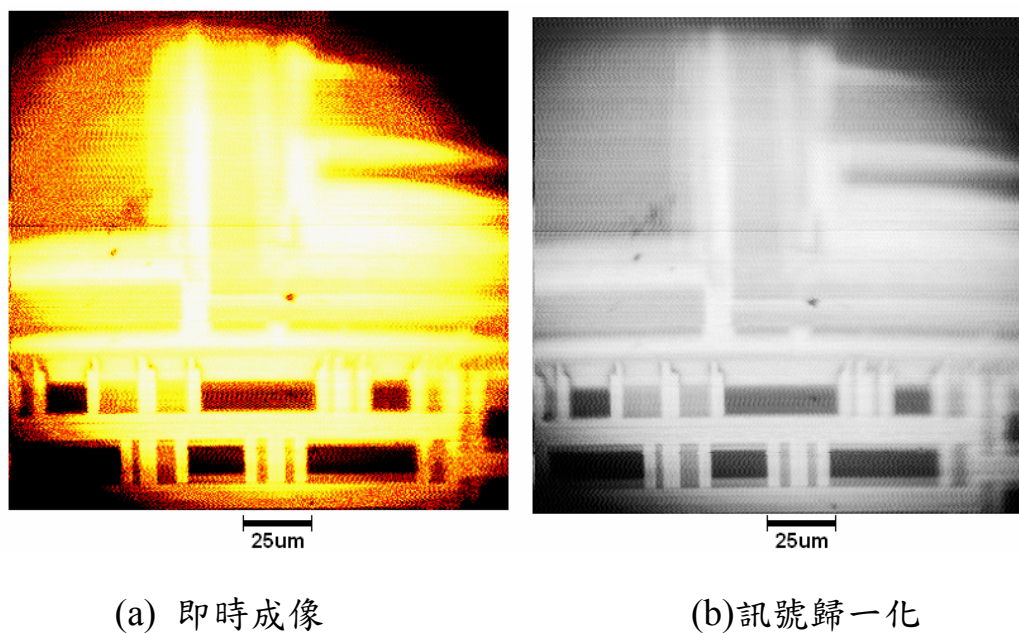


圖 3-8 矽晶片背面即時成像與歸一化成像比較

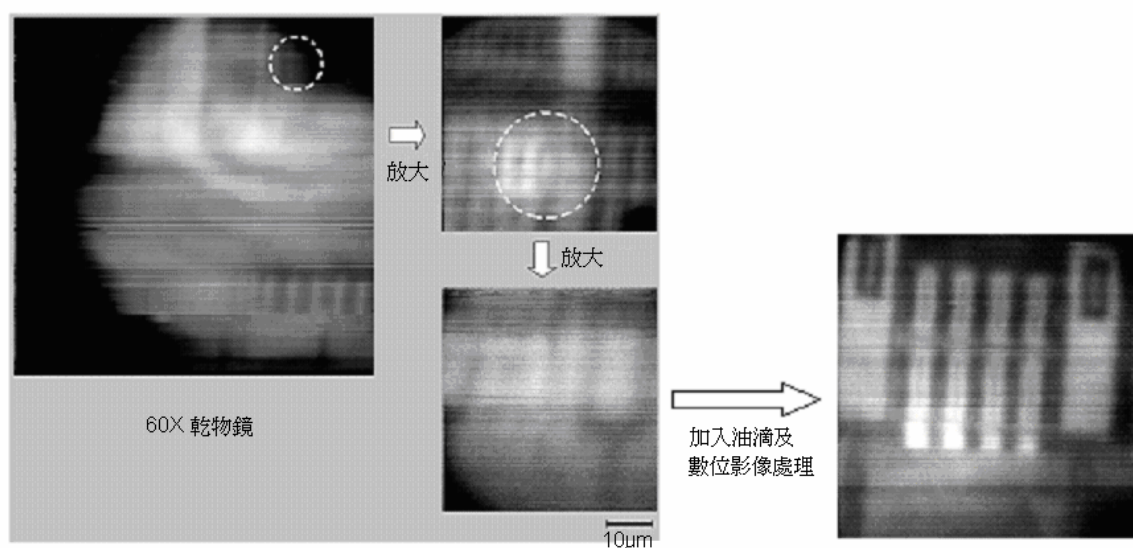


圖 3-9 60X 物鏡掃瞄成像結果。延著箭頭為縮小掃瞄間距得到的連續放大圖。右圖則為加入油滴後再利用數位影像處理的結果。

3-3. 雜訊分析

在這一節我們要討論雜訊對成像的影響，並利用訊噪比 (signal-to-noise ratio, SNR or S/N) 來比較不同掃瞄條件下雜訊對成像品

質的影響。理論上，光探針的尺寸愈小，則解析度愈好；光入射功率愈強，訊噪比愈強，則影像對比也愈高。但由於本實驗利用光虹限制入光束大小，因此較小的探針必然伴隨較小的入射強度($\sim mW$)，其 S/N 值也會下降。故在接下來的分析裡，我們將循序討論幾種雜訊對成像訊噪比的影響，並設法針對不同的雜訊提出改進的方式。

- 背景雜訊
- 輸入雷射光源的準位浮動
- 偵測器雜訊

一般偵測器所能捕捉到訊號為功率，在經電路系統後轉換後則以電壓形式表示，此稱為偵測器的反應力(Responsivity)，其單位為 V/W。在本實驗裡我們所使用的偵測器為光二極體，其反應力設定為 $\frac{1}{10}$ V/W。

現在假設偵測器偵測到的電壓訊號為 V_s ，雜訊為 V_n ，則訊噪比可表示為：

$$S/N = 20 \log_{10} \left(\frac{V_s}{V_n} \right)$$

為對訊噪比的值有更具體的概念，我們以兩個例子加以說明。假設有一訊號源 $V_s = 10mV$ ，噪音源 $V_n = 1mV$ 。由於兩者相差 10 倍，直覺看來成像品質受雜訊的干擾很小，則此時的訊噪比為：

$$S/N = 20 \log_{10}(10.0) = 20.0 \text{ dB}。$$

因此當 S/N 值大於 20 時，其雜訊可忽略不計。

但當訊號太過微弱，使得訊號僅略大於雜訊電壓，例如 $V_s/V_n = 1.30$ ，則此時訊噪比為：

$$S/N = 20 \log_{10}(1.30) = 2.28 \text{ dB} ,$$

我們將上述值定義為可容忍訊噪比之極限，這意味當訊噪比愈接近此值時，則影像也愈難辨析。

此外，要增加訊噪比的方法有：增加光與樣品之間反應(如提高入射光功率)、降低雜訊，以及加強偵測器之光感度。而其中最直接的方法便是提高入射光功率，但是如果能量太強，不但伴隨著較大之掃描光點，且光在基板內造成大量散射反而會引入不必要的雜訊。故由實驗中發現，當輸入強度之電壓訊號為 0.5mV (光功率: 5mW)時，在晶片背面掃描成像上可得到最佳品質。



3-3-1. 背景雜訊

背景雜訊為實驗時未加任何訊號時所得到的訊號，通常為熱擾動與環境電磁波干擾的結果。為了確定這樣的背景雜訊是否對成像有太大影響，我們紀錄實驗室裡雜訊與時間的關係如圖 3-10 所示：

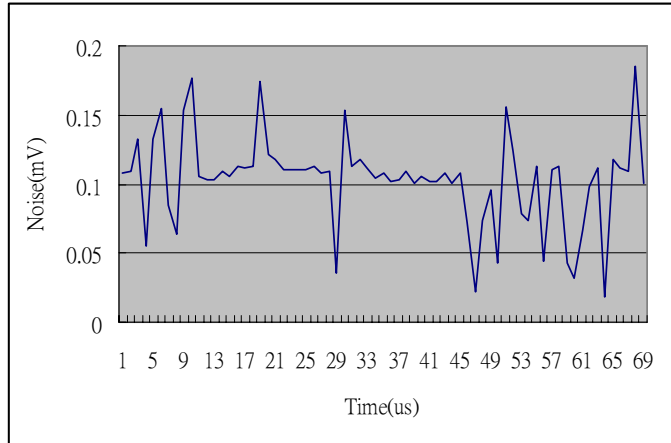


圖 3-10 雜訊記錄圖

上圖為 69 個隨時間採得的數據紀錄圖。但實際上在統計時，我們是利用程式取得 160000 個採樣數據之最大、最小及平均值，其分別為 0.184mV、0.042mV 以及 0.1185mV。則雜訊之方均根值可由(3-7)式求得。

$$V_{n,rms} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (V_n - V_{average})^2}{N}} \quad (3-7)$$

其中 V_n 為第 n 個量測到的值， N 為採樣數量 160000， $V_{average}$ 為平均值 0.1185mV，故最後求得的雜訊方均根值為 $V_{n,rms} = 0.0166\text{mV}$ 。

接下來我們用同樣的方法求出三種不同掃描圖片之最大、最小、平均，以及訊號方均根值，其值列表 3-2。而每組資料皆由 160000 個數據所求得(因為每張圖片為 400×400 像素)。要注意一點是，表中訊號 $V_{d,rms}$ 本身就包含了雜訊，即真正訊號 $V_s \approx V_{d,rms} - V_{n,rms}$ ，故訊噪比要修正為：

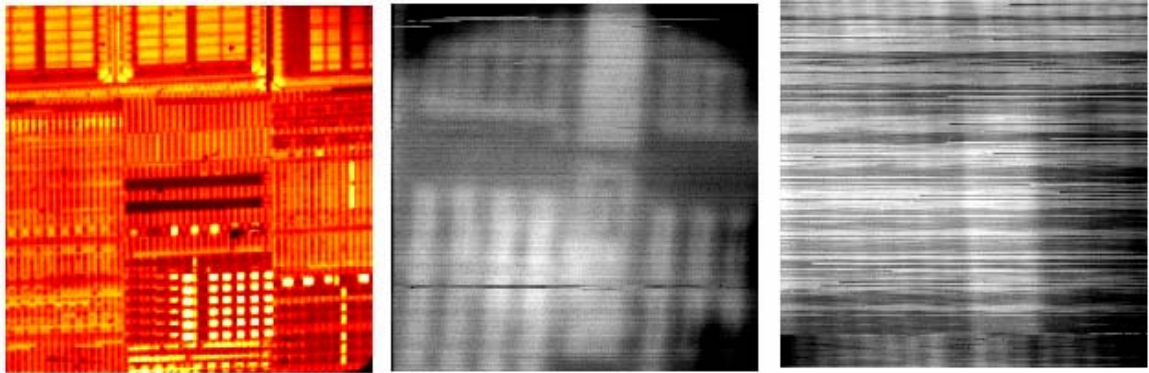
$$SNR = 20\text{Log} \frac{V_{d,rms} - V_{n,rms}}{V_{n,rms}} = 20\text{Log} \left(\frac{V_{d,rms}}{V_{n,rms}} - 1 \right) \quad (3-7)$$

	入射光強度(mV)	反射訊號最大值 V_{max} (mV)	反射訊號最小值 V_{min} (mV)	反射訊號最 小 值 $V_{average}$ (mV)	訊號方均根 $V_{d,rms}$ (mV)
晶片正面掃瞄 (12mmX12mm)	12.337	11.4375	2.875	4.322	4.833
(0.18 μ m 製程晶片)背面掃瞄 (0.3mmX0.3mm)	0.483	0.352	0.221	0.274	0.098
(0.09 μ m 製程晶片)背面掃瞄 (0.3mmX0.3mm)	0.480	0.410	0.368	0.377	0.049

表 3-2 不同晶片掃瞄訊號

當 $V_{d,rms} \geq 10 V_{d,rms}$ 時，則對數中的 1 可忽略。

接下來由(3-7)式，我們可求得表 3-2 中三種不同掃瞄資料之訊噪比。其中晶片正面掃瞄訊號浮動量極大，訊噪比約 49.25，故得到的成像相當清晰(如圖 3-11(a));0.18 μ m 製程晶片背面掃瞄之訊噪比約 13.81，成像品質尚可接受(如圖 3-11(b))；而 0.09 μ m 製程之晶片背面掃瞄，由於結構緊密且起伏小，故訊號浮動量小，其訊噪比也僅有 5.81 (如圖 3-11(c))。以上計算的結果與我們觀察到的掃瞄圖片情況大致吻合，但其中 0.09 μ m 製程晶片因訊號值太小，故還有其它雜訊干擾必須考慮。



(a) 晶片正面掃瞄 (b) (0.18 μm 製程晶片)背面掃瞄 (c) (0.09 μm 製程晶片)背面掃瞄

圖 3-11 表 3-2 中所採用的圖片

另外，還有一種背景雜訊僅發生在做顯微鏡觀察時。由於雷射同調性極佳，一般無法做為照明光源，因此在光路中會加入振動擴散片(Light shaping diffuser, LSD)做為破壞同調性及均勻光源之用，其規格與原理可參照文獻[2]。



擴散片是利用製程方式在透明基板上隨機成長尺寸約 100 μm 的不規則顆粒結構，於是當光束經過擴散片後就如同有一圖像入射物鏡，在照射到晶片結構上後則形成了另一種背景雜訊。圖 3-12 為平行光入射擴散片後進入物鏡示意圖。圖 3-10 中的擴散片發散角為 5°，而 S 為擴散片與物鏡組距離， M 為經過擴散片後光束放大倍數，則由等比例式：

$$\tan 20^\circ = \frac{d/2}{X} = \frac{Md/2}{X+S} \quad (3-8)$$

可得放大倍數

$$M = 1 + \frac{S}{X} = 1 + \frac{S}{d/(2 \tan(5^\circ))} = 1 + 0.728 \frac{S}{d} \quad (3-9)$$

我們將(3-9)式中的 S 與 d 分別以 5cm 及 0.2cm 取代，可得 $M=18$ 。則圖像在經過物鏡後，顆粒縮小尺寸約可由 $1.22\lambda f/Md$ 求得，其中 $\lambda=1064\text{ nm}$ ， $f=3\text{ mm}$ ， $d=100\text{ }\mu\text{m}$ ，故最後可求得擴散片造成平均雜訊尺寸約 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。這對一般晶片次微米結構而言已是不可忽略的干擾，因此在實驗過程中，我們幾乎無法利用顯微鏡觀察 $0.09\text{ }\mu\text{m}$ 製程晶片的結構，故僅能藉由掃瞄系統的重組下，則可得到大致的影像(如圖 3-11(c)、圖 3-13，及圖 3-17 所示)。

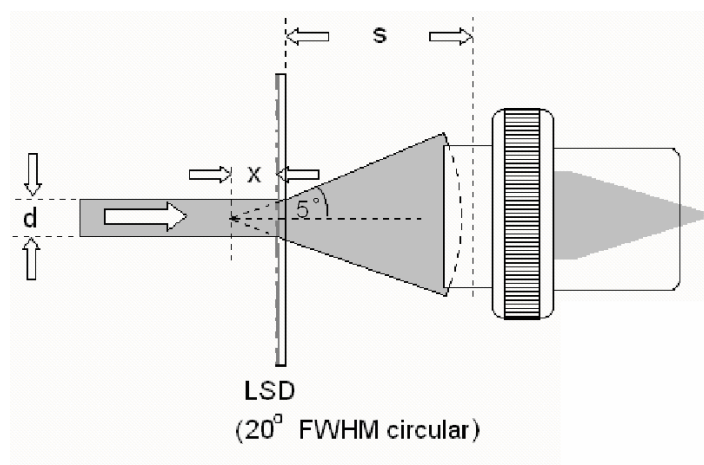


圖 3-12 散射片作用機制

3-3-2. 輸入雷射光源之準位浮動

雷射光源本身存有穩定性問題，這個問題只對掃瞄系統產生影響。因為在掃瞄成像所花費的時間較長，故雷射準位隨時間變動的情形會清楚紀錄在圖片不同位置上，這也是為什麼部分背面圖像上會有不均勻之粗細線條產生。

在討論雷射準位浮動的影響以前，我們先將部分所需的雷射規格列於表 3-3 中。由表格中可發現，隨著雷射開啟時間增長，雷射穩定性愈差，而這樣的干擾對不同晶片的成像也會有不同等級的影響。

波長 (nm)	輸出功率(mW)	穩定性		雜訊(rms, 10Hz-1MHz)
1064	250	>2 hr	<1%	< 0.5%
		>24 hr	<2%	

表 3-3 雷射品質與穩定性

以表 3-2 中的晶片掃瞄為例，我們將訊號浮動範圍以灰階模式表示出來(即八位元圖像)，即訊號從最大值到最小值總共被畫分成 256 個等級，每單位灰階值所代表的訊號解析度為 $\Delta = (V_{\min} - V_{\max}) / 2^8$ mV。意即當訊號變化大於 Δ 時，灰階會偏移一階。

通常 1、2 階的變化肉眼無法辨視出來，但當準位偏移量所對應的階數太大，使得與真正訊號相比已不可忽略時，則的灰階偏移之干擾則會顯現出來，如圖 3-13 所示。

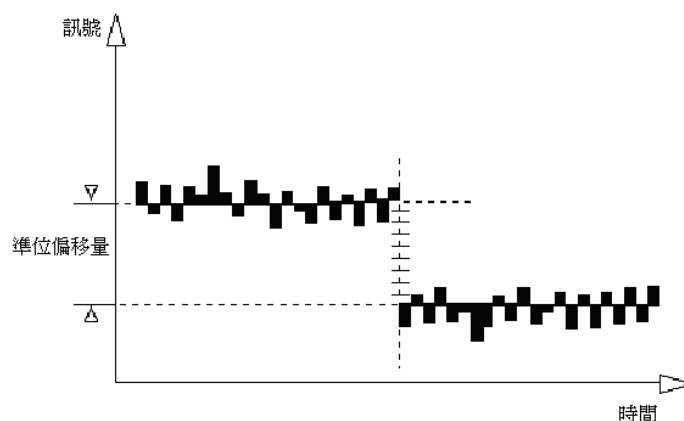


圖 3-13 訊號準位浮動示意圖

其造成的最大灰階誤差值 ε 可以表示為：

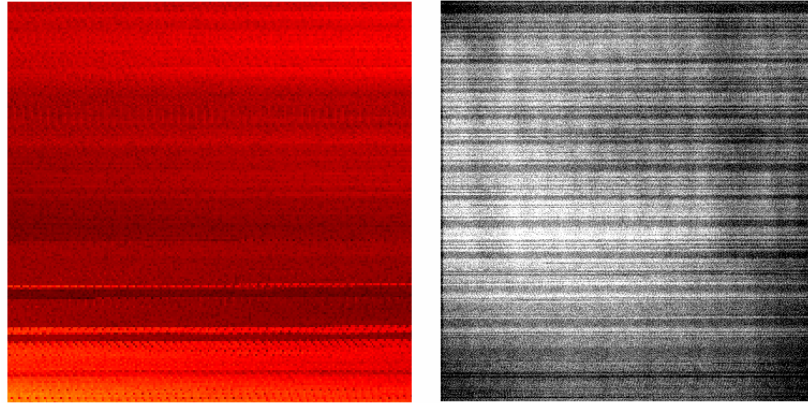
$$\varepsilon = \left\lceil \frac{\text{訊號平均值} \times \text{準位浮動百分比}}{\text{灰階解析度}} \right\rceil = \left\lceil \frac{V_{average} \times 2\% \times 2^8}{V_{max} - V_{min}} \right\rceil \quad (3-10)$$

於是將表 3-2 中的掃瞄數據代入(3-10)式後，可得到以下表格。

	反射訊號 最大值 V_{max} (mV)	反射訊號 最小值 V_{min} (mV)	反射訊號平均 值 $V_{average}$ (mV)	灰階解析度 Δ (mV)	灰階差值 ε (階)
前面掃瞄 (12mmX12mm)	11.4375	2.875	4.322	0.03345	2
(0.18 μ m 製程晶 片) 背面掃瞄 (0.3mmX0.3mm)	0.352	0.221	0.274	0.000512	10
(0.09 μ m 製程晶 片) 背面掃瞄 (0.3mmX0.3mm)	0.410	0.368	0.377	0.000164	45

表 3-4 準位浮動對不同晶片之灰階影響

由上表的灰階物差值可知，三張掃瞄圖片的因準位變動所造成的灰階變動分別是 0.78%、3.9%及 17.58%。由此可知，0.09 μ m 製程晶片成像所受到的影響最大，如圖 3-14 所示。對於這樣的干擾，我們提出以下三點解決方法。第一可利用回授電路穩定雷射的電源供應器，但需額外的電路系統。第二是額外加裝一分光鏡及偵測器，以紀錄輸入光源之強度，並對該時間點的訊號做歸一化(Normalization)。第三則是利用數位影像的方式消除背景浮動，雖然可免除儀器上變動，但也需要較複雜的演算流程。



(a) 雷射浮動紀錄圖 (b) 雷射浮動 0.09 μm 製程晶片之成像影響

圖 3-14 雷射準位浮動對影像的影響。

3-3-3. 偵測器雜訊

一般偵測器在讀取訊號時電子系統本身亦會產生雜訊，這些雜訊的干擾對一些需要高度精準如光子偵測器而言相當重要。雖然大部分的雜訊分析都是針對 CCD 來討論，但由於 CCD 在本實驗中僅為輔助觀察的工具，因此我們僅概要說明其雜訊性質。一般的電路雜訊分為偵測雜訊 (Detection Noise)，其中包含讀取雜訊(Readout Noise)、影像頻道雜訊 (Video Channel Noise)以及黑暗雜訊(Dark Noise)等。我們列表簡單說明這些雜訊的原因及影響程度。

	原因	影響
讀取雜訊	頻寬、反應速率、偵測器敏感度。	較大，其造成因素與電路設計有關，其改良方式有限。
頻道雜訊	傳輸介面阻抗、電磁波干擾。	通常影響極小，與各儀器介面情形有關。
暗雜訊	熱效應及元件偏壓之漏電流。	通常可忽略，但當電阻性元件愈多，則影響則浮現出來。

表 3-5 偵測雜訊之種類與形成原因

接下來我們介紹本系統主要的偵測器雜訊源—電阻。由於掃瞄系統主要偵測器是以光二極體及類比數位轉換器(Analog-to-Digital Converter, ADC)組合而成，其中前者為電流輸出，後者為電壓輸入，故兩者間需以電阻做轉阻之用。然而考量到由光二極體輸入的電流訊號通常小，我們會加入大電阻($\sim M\Omega$)使輸入 ADC 之電壓訊號變大，因此，我們也要特別討論這樣的大電阻對成像的影響有多大。

一般當溫度大於絕對零度時，電子會在電阻中隨機移動，並以隨機電壓形式顯示出來，此稱為電壓雜訊。在無任何電源輸入下，經歷一小段時間(μs)之電壓雜訊平均值通常為零，但其方均根值則不，故這也意味著電阻會產生雜訊功率而影響轉阻之線性關係[3]。根據普蘭克黑體幅射理論可推導出雜訊電壓的方均根值為：

$$V_{n,rms} = \sqrt{\frac{4hfBR}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}} \quad (3-10)$$

其中

h : 普蘭克常數(J-s)。

k : 波茲曼常數 (J/K)。

T : 凱氏溫度(K)。

B : 輸入系統頻寬(Hz 或 1/sec)。

f : 操作中心頻率 (Hz)。

R : 電阻值(Ω)。

其中，由於我們採用的是研華公司出產的十六位元 PCI-1716 類比數位轉換卡，其頻寬為 250k/sec，而系統的中心操作頻率 f 不詳。但由於普蘭克常數遠小於波茲曼常數，故除非 f 是微波以上之波段，否則我們一律視 $hf \ll kT$ 。因此將分母一階近似後可得到：

$$e^{hf/kT} - 1 \simeq hf/kT,$$

則(3-10)式可簡化為

$$V_{n,rms} = \sqrt{4kTBR} \quad (3-11)$$

再將 3-11 式代入訊噪比的定義中，可得到：

$$SNR = 20 \text{Log}_{10} \frac{V_s}{\sqrt{4kTBR}} \quad (3-12)$$

現在我們以表 3-4 中 $0.18\mu\text{m}$ 製程晶片背面掃瞄為例，假設室溫為 300 K，平均訊號為 0.098mV，則代入(3-12)式後可得訊噪比與電阻的關係如圖 3-15 所示。

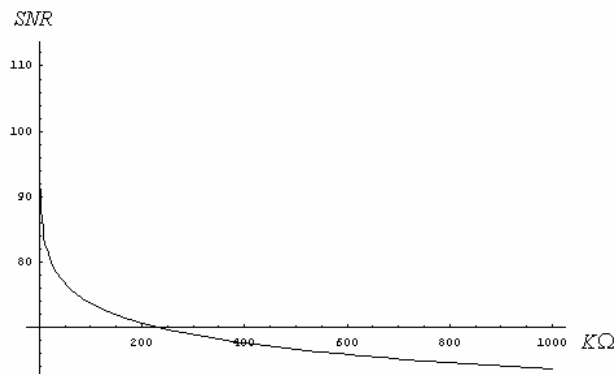
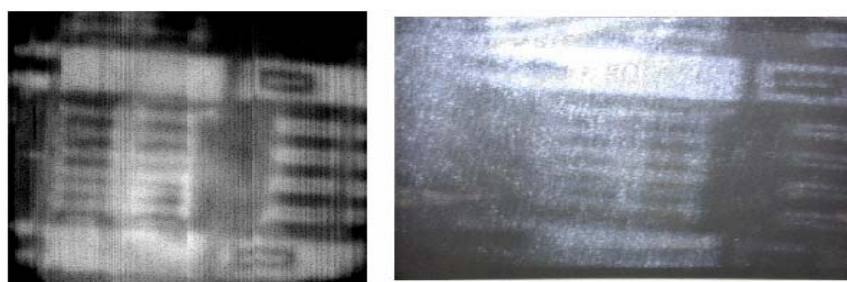


圖 3-15 室溫下，訊噪比與電阻關係曲線圖

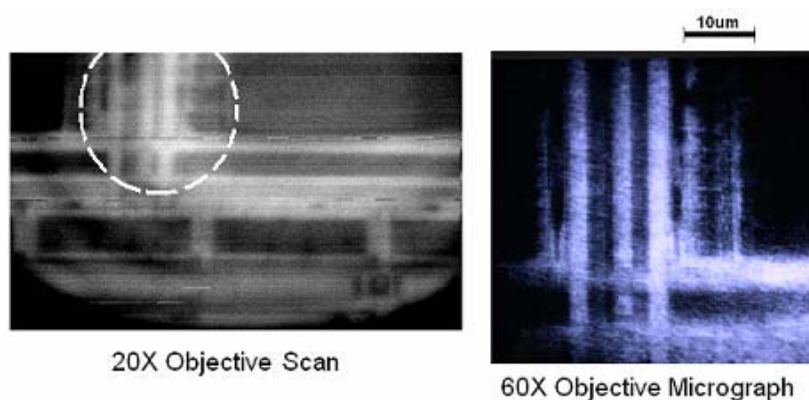
故從圖 3-15 的曲線關係得知，就本實驗而言，即使電阻值高達 $1M\Omega$ 以上，但其雜訊干擾仍可忽略不計。不過要注意的是，當電流訊號過小以至於所採用的電阻大於 $20M\Omega$ 時，則我們可參考文獻[4]中的偏壓或電路配置方式以降低電阻雜訊的干擾。

現在我們將經過介質耦合、雜訊改良及數位影像處理過的掃瞄圖像與顯微鏡成像做一個比較。圖 3-16 及圖 3-17 分別為掃瞄與顯微鏡得到的成像，其中掃瞄系統已利用經過介質耦合及數位處理過，其解析度與訊噪比都比顯微鏡成像要來得高。



(a) 掃瞄圖片。 (b) 顯微鏡圖片，雜訊主要來自於擴散片。

圖 3-16 同樣 60X 物鏡下掃瞄與顯微鏡背面成像結果($0.18\mu\text{m}$ 製程)。



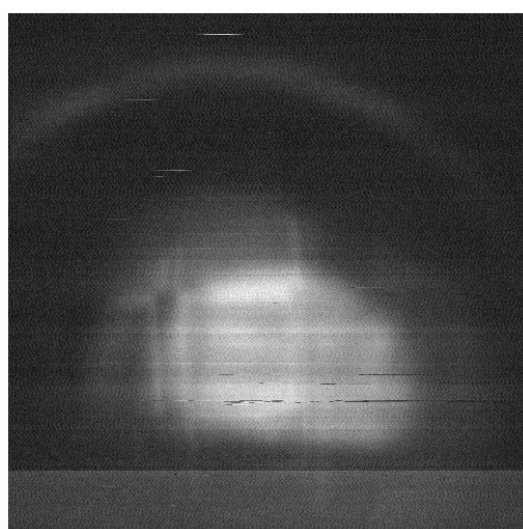
(a) 掃瞄圖片 (b) 顯微鏡圖片，為圖(a)之虛線處

圖 3-17 兩種不同物鏡背面成像成果。掃瞄所使用的物鏡倍率

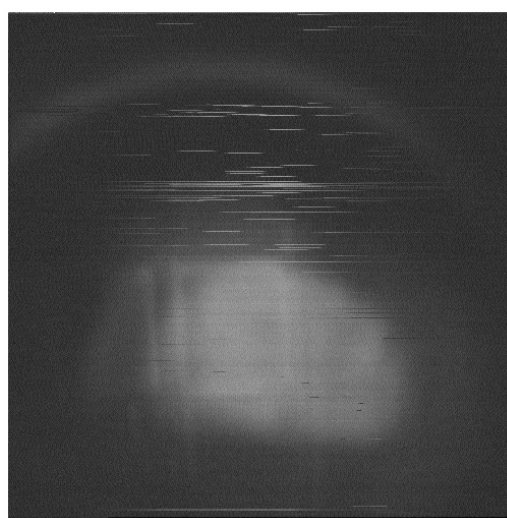
為顯微鏡的三分之一倍，但解析度幾乎相同。

3-4 熱影像

在本章最後一節，我們將掃瞄系統應用在矽晶片溫度變化的觀察上。本實驗所使用的光源為 1064nm 的近紅外光，其光子能量處於矽能階的吸收邊緣(光子:1.17eV；能階:1.12eV)。故當矽基板溫度上升時，矽能階下降，則光子會被價電帶電子大量吸收而有訊號損失，這樣的效應稱為能階吸收(Band-to-Band Absorption)[5]，其吸收比例與溫度關係由文獻[6]可得。因此，利用這樣的特性，我們可以間接透過光吸收的結果得到晶片之熱影像。以 0.09 μm 製程晶片為實驗樣品，在完全相同的掃瞄條件下，我們各別取得晶片加入電源前後的掃瞄圖像。其中輸入電壓為 3 伏特，輸入電阻為 27.5 K Ω ，輸入電流 0.109mA，加熱接點的尺寸約 100 μm ，掃瞄時間為 2 小時，則掃瞄結果如圖 3-18 所示。



(a) 未加偏壓前之背面掃瞄圖像



(b) 加入偏壓後的背面掃瞄圖像

圖 3-18. 矽晶片加入電壓前後比較圖

很明顯我們發現，加入偏壓前後的影像強度、對比都有顯著改變，故這樣的現象能應用在電路缺陷檢測上。一般製程過程中，電路的錯誤常是因不預期的接點短路所造成，而這種短路所造成的大電流會使在該點產生局部性升溫，使得照射在該區域之光子被大量吸收而呈現暗點。雖然理論上這樣的機制可用於來缺陷檢測上，但從圖 3-17 中可發現，我們無法看出特定的發熱區域，這是由於我們用金屬接點加偏壓的方式模擬缺陷，其發熱面積大而不集中，故在長時間掃瞄下，只能觀測到熱在大面積上擴散的結果，這樣的問題在實際電路缺陷中應可獲得改善。

參考文獻：

[1] Frank J. Pedrotti, Leno S. Pedrotti, "Introduction to Optics," Prentice Hall, pp.396, 1992.

[2] "Light Shaping Diffuser," Physical Optics Co., 2003. (<http://www.poc.com/lsd/default.asp>)

[3] Paul R. Gray, Paul J. Hurst, Stephen H. Lewis, Robert G. Meryer, "Analysis and Design of Analog Integrated Circuits," Wiley, 4th ed., pp. 1211-14, 2001.

[4] "A primer on Photodiode Technology," Centrovision. Co. ,2003. (<http://science.unitn.it/~semicon/pavesi/tech2.pdf>)

[5] Qianwang Chen, Y Zhang, Y T Qian, "Carrier band-to-band recombination in Mn-passivated porous silicon," Journal of Physics: Condens. Matter Vol.13, pp. 5377-5385, 2001.

[6] 陳俊誌，「單矽晶片光學性質及其應用在積體電路檢測之研究」，國立交通大學，碩士論文，民國 92 年。