

第五章

二氧化鉛金屬閘極場效電晶體的電性量測

5-1 緒論

本實驗所製作的場效電晶體為n通道的二氧化鉛金屬閘極場效電晶體，分別設計了三種尺寸，包括了 $W/L=200\mu\text{m}/800\mu\text{m}$ 、 $W/L=500\mu\text{m}/2000\mu\text{m}$ 和 $W/L=1100\mu\text{m}/2000\mu\text{m}$ ，我們量測了二氧化鉛金屬閘極場效電晶體的基本電性，像是 $I_{DS}-V_{DS}$ 特性、 $I_{DS}-V_{GS}$ 特性和 I_G-V_{GS} 等特性，從這些特性我們獲得了次臨界斜率(subthreshold swing)、臨界電壓(threshold voltage)、電導(transconductance)和遷移率(mobility)等資訊，又利用charge pumping的方法量測了其界面缺陷密度，最後我們對二氧化鉛金屬閘極場效電晶體作正偏壓溫度相關不穩定(Positive Bias Temperature Instability,PBTI)測試，觀察在長時正偏壓下其電性變化情形。

5-2 場效電晶體的電容特性

圖 5-1 是二氧化鉛金屬閘極場效電晶體的 C-V 特性，量測頻率為 100kHz，由聚積狀態時的電容值我們換算出 SC1 前處理未退火、經過 600°C 和 800°C 退火後的二氧化鉛薄膜電容等效厚度分別為 2.11nm、2.3 nm 和 3.33nm，而 RTO 前處理未退火、經過 600°C 和 800°C 退火後的二氧化鉛薄膜電容等效厚度分別為 2.62nm、2.72 nm 和 3nm，這和第四章中由量測二氧化鉛電容得到的電容等效厚度相當接近，另外由於汲極和源極浮接(floating)的原因，電容值在反轉區由於沒有源極和汲極提供少數載子，所以在反轉區的電容值並沒有上升，圖 5-2 是 SC1 前處理經過 800°C 退火的二氧化鉛場效電晶體，源極和汲極與矽基板等電位時的 C-V 曲線，由聚積電容值和反

轉電容值相等，說明了 TaPt 閘極沒有多晶矽閘極在反轉區閘極空乏(gate depletion)的問題。

5-3 $I_{DS}-V_{DS}$ 特性

圖 5-3 和圖 5-4 分別是SC1 前處理和RTO前處理的二氧化鉛場效電晶體的 $I_{DS}-V_{DS}$ 特性，由於電晶體的通道長度為 800um，其電流特性符合長通道元件特性而沒有明顯的通道調變效應，而不論是SC1 前處理或是RTO前處理的二氧化鉛場效電晶體，在相同閘極電壓下的汲極電流皆隨著退火溫度升高而增加。由 5-1 式場效電晶體在飽和區時的汲極電流公式我們知道在相同閘極電壓且相同元件尺寸下，影響汲極電流大小的因素包括了臨界電壓、遷移率和絕緣層電容。由於退火後絕緣層電容變小，所以造成退火後汲極電流增加的可能原因就是臨界電壓下降或是遷移率上升，在後續的小節將會有詳細的討論。最後我們發現SC1 前處理經過 600°C 退火的二氧化鉛場效電晶體其 $I_{DS}-V_{DS}$ 曲線在低汲極電壓時並非線性的關係，這表示其串聯阻抗較大，可能是接觸窗蝕刻不良所造成。

$$I_{D,sat} = \frac{W}{L} \mu_{eff} C_{ox} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (5-1 \text{ 式})$$

5-4 臨界電壓(threshold voltage)

圖 5-5 和圖 5-6 分別是SC1 前處理和RTO前處理的二氧化鉛場效電晶體在汲極電壓為 50mV時的 $I_{DS}-V_{GS}$ 特性，而我們可以由 $I_{DS}-V_{GS}$ 特性萃取出臨界電壓，當場效電晶體操作在線性區(linear region)時，其電流公式為 5-2 式，對 $I_{DS}-V_{GS}$ 圖形微分可以得到電導值(5-3 式)，而利用電導值最大時的 V_{GS} 對 $I_{DS}-V_{GS}$ 作切線和 V_{GS} 軸的交點為 $V_{GS}=V_T+V_{DS}/2$ ，因此 $V_T=V_{GS}-V_{DS}/2$:

$$I_{D,lin} = \frac{W}{L} \mu_{eff} C_{ox} (V_{GS} - V_T - \frac{V_D}{2}) V_D \quad (5-2 \text{ 式})$$

$$g_m = \frac{\partial I_{D,lin}}{\partial V_{GS}} \quad (5-3 \text{ 式})$$

經過計算後 SC1 前處理未退火、經過 600°C 和 800°C 退火後的二氧化鉛場效電晶體臨界電壓分別為 0.79V、0.33V 和 0.36V，而 RTO 前處理未退火、經過 600°C 和 800°C 退火後的二氧化鉛場效電晶體臨界電壓分別為 0.7V、0.66V 和 0.54V，而隨著退火溫度增加臨界電壓下降表示退火處理消除了二氧化鉛中的一些缺陷，而臨界電壓下降也是造成 5-3 節中退火後的二氧化鉛場效電晶體其汲極電流增加的一個原因，不過從 SC1 前處理經過 600°C 和 800°C 退火後的二氧化鉛場效電晶體臨界電壓相近，但是汲極電流經過 800°C 退火後仍大幅上升的情況，我們相信遷移率是影響汲極電流的主要因素。

5-5 次臨界斜率(subthreshold swing)

次臨界斜率的定義為當汲極電流增加十倍時所需要增加的閘極電壓，而當我們作 $\log_{10}(I_{DS}) - V_{GS}$ 圖時，其線性區斜率的倒數即為次臨界斜率。由圖 5-5 和 5-6 中經過計算後 SC1 前處理未退火、經過 600°C 和 800°C 退火後的二氧化鉛場效電晶體次臨界斜率分別為 110.4mV/dec、93mV/dec 和 93mV/dec，而 RTO 前處理未退火、經過 600°C 和 800°C 退火後的二氧化鉛場效電晶體次臨界斜率分別為 156.1mV/dec、97.5mV/dec 和 84mV/dec，由 5-4 式知道次臨界斜率和界面缺陷有關，而隨著退火溫度增加次臨界斜率下降表示退火處理降低了二氧化矽和矽基板之間的界面缺陷。介面缺陷降低會減少庫倫散射(coulomb scattering)，可提高載子遷移率，對驅動電流會有幫助。

$$S = \ln 10 \times \frac{kT}{q} \left(1 + \frac{C_{it} + C_D}{C_{ox}} \right) \quad (5-4 \text{ 式})$$

5-6 I_G - V_{GS} 特性

圖 5-7 和圖 5-8 分別是SC1 前處理和RTO前處理的二氧化鉛場效電晶體的 I_{GS} - V_{GS} 特性，在相同的電容等效厚度下，二氧化鉛薄膜的漏電流都較二氧化矽漏電流低上幾個數量級，而在正偏壓時的漏電流都大於負偏壓時的漏電流，這是因為能帶不對稱造成的結果，最後SC1 前處理和RTO前處理的二氧化鉛場效電晶體在閘極電壓為 $(V_{fb}+1)V$ 時的漏電流皆在 $6 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-7} (A/cm^2)$ 之間。

5-7 利用 charge pumping 方法量測界面缺陷密度

圖 5-9 是SC1 前處理和RTO前處理的二氧化鉛場效電晶體利用charge pumping的方法量測到的 I_{cp} 對基準電壓的關係圖，量測條件為輸入固定振幅為 1.5V的方波，頻率為 1MHz， t_r 和 t_f 皆為 100ns，基準電壓則從-2V掃到+1V，圖 5-9 是利用 5-5 式計算出的界面缺陷密度，其中 f 是輸入方波的頻率， A_G 是閘極面積：

$$I_{cp} = qfA_G \int_{E_{em,h}}^{E_{em,e}} D_{it}(E) dE \approx qfA_G \overline{D_{it}}(E_{em,e} - E_{em,h}) \approx qfA_G \overline{D_{it}} \Delta\phi_s \quad (5-5 \text{ 式})$$

從圖 5-10 我們發現不論 SC1 前處理或是 RTO 前處理的二氧化鉛場效電晶體，經過退火後其界面缺陷密度明顯降低，界面缺陷密度的多寡和次臨界電壓斜率的高低吻合。

5-8 遷移率(mobility)

遷移率在場效電晶體中是一個很重要的參數，其直接影響到驅動電流的大小，由於邏輯電路需要較大的驅動電流能力，因此遷移率越大越好；一般來說當閘極電壓較小時，遷移率主要受庫侖散射影響，當閘極電壓較大時則主要受介電層和矽基板間的表面散射(surface scattering)影響，然而文獻

[54]提出當閘極介電層為高介電常數材料時，影響遷移率的主要機制是聲子散射 (phonon scattering)，聲子散射主要是來自於二氧化鈣的極化 (polarization)，造成其低能量表面光學聲子形式(surface optical mode)和反轉區通道內的電子產生交互作用導致遷移率下降。而文獻[55]提出二氧化鈣下方的二氧化矽可以減少聲子散射的效應，另外在反轉區時，金屬閘極比發生閘極空乏的多晶矽閘極具有較高的自由電子濃度，因此能夠有效地屏蔽聲子散射對反轉區通道內電子的作用。

圖 5-11 是SC1 前處理和RTO前處理的二氧化鈣場效電晶體利用 5-6 式計算出遷移率對閘極電壓的關係，5-6 式中 g_d 是汲極電導， Q_n 為通道內的電荷密度，至於橫軸為閘極電壓而不是採用垂直等效電場(effective field)主要是因為 Q_n 是用 $C_{ox}(V_{GS}-V_T)$ 的近似方式計算，再換算出的垂直等效電場準確性有待商榷，加上本小節主要目的比較不同實驗條件下的遷移率，所以橫軸仍然採用閘極電壓：

$$\mu_{eff} = \frac{g_d L}{W Q_n} \left(g_d = \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}}, Q_n \cong C_{ox} (V_{GS} - V_T) \right) \quad (5-6 \text{ 式})$$

圖 5-11(a)顯示出SC1 前處理經過 600°C退火後的二氧化鈣場效電晶體其遷移率較未退火的遷移率要低，而經過 800°C退火後的二氧化鈣場效電晶體其遷移率則大幅上升，經過 600°C退火後的二氧化鈣場效電晶體其遷移率下降主要跟汲極和源極的串聯阻抗有關，由 5-3 節我們知道其串聯阻抗效應相當嚴重，因此串聯阻抗效應造成 g_d 下降而導致其遷移率降低，至於經過 800°C退火後遷移率上升是因為二氧化鈣下方的二氧化矽增厚，導致聲子散射作用降低而遷移率增加，至於圖 5-11(b) RTO前處理的二氧化鈣場效電晶體其遷移率隨著退火溫度增加而上升，這是因為隨著退火溫度增加，二氧化鈣下方的二氧化矽厚度增加，因此其聲子散射的作用降低造成遷移率增加，由圖 5-11(a)和(b)作比較，我們發現RTO前處理的二氧化鈣場效電晶體其遷移率皆優於SC1 前處理的二氧化鈣場效電晶體，這可能和RTO前處理的二氧化鈣場效電晶體具有較厚的二氧化矽厚度而聲子散射和庫侖散射較輕微有關。此外，因為RTO前處理退火後的二氧化鈣缺陷密度較SC1 前處理為火後

的二氧化鉛低，若有來自二氧化鉛中缺陷電荷的庫倫散射，影響也會比較輕微。

5-9 正偏壓溫度相關不穩定(PBTI)測試

圖 5-12 是SC1 前處理和RTO前處理的二氧化鉛場效電晶體進行正偏壓溫度相關不穩定(PBTI)測試後，臨界電壓變化量和偏壓時間的關係圖。施加的偏壓為+2V，臨界電壓變化量是在偏壓特定時間後量測線性區 $I_{DS}-V_{GS}$ 曲線其臨界電壓和偏壓前的臨界電壓差值，臨界電壓的定義是當汲極電流為100nA時的閘極電壓，為了避免量測 $I_{DS}-V_{GS}$ 曲線時電荷逃脫(charge detrapping)的現象[56]，量測時間和下一次偏壓之間的時間盡量縮短。由圖 5-11 發現不論是是SC1 前處理或是RTO前處理的二氧化鉛場效電晶體，隨著偏壓時間增加，其臨界電壓的變化量也隨之增加，而由 ΔV_{th} 對 $\log(t)$ 的作圖顯示臨界電壓的變化量幾乎呈現一線性關係，這表示在二氧化鉛中被本體缺陷(bulk trap)捕捉的電荷是均勻分佈的[57]，而SC1 前處理和RTO前處理的二氧化鉛場效電晶體隨著退火溫度增加其臨界電壓變化量皆降低。由於臨界電壓變化量可能來自於二氧化鉛的本體電荷捕捉(bulk trap)或是二氧化矽和矽基板間的界面電荷捕捉(interface trap)，為了釐清造成臨界電壓偏移的原因，我們觀察了經過 1000 秒偏壓後和偏壓前電導和次臨界斜率的變化量。圖 5-13 顯示SC1 前處理和RTO前處理的二氧化鉛場效電晶體電導值和次臨界斜率在偏壓 1000 秒後的變化量，SC1 前處理和RTO前處理未退火的二氧化鉛其電導值變化量在偏壓 1000 秒後大約為 9~11%之間，而次臨界斜率變化量在偏壓 1000 秒後皆小於 2%。從和界面缺陷密度有關的次臨界斜率變化量極小和電導值變化量 9-11%的結果，我們可以推斷臨界電壓偏移主要是來自於二氧化鉛的本體捕捉電子造成的，而隨著退火溫度升高由於二氧化鉛下方的二氧化矽厚度增加，減小了電子穿隧過二氧化矽而被二氧化鉛中本體缺陷捕捉的機率，所以導致臨界電壓的變化量下降[58]，最後表 5-1 是SC1 前處理和RTO前處理的二氧化鉛場效電晶體的一些特性。