

第六章

二氧化鈣薄膜的崩潰機制和可靠度

6-1 緒論

本章量測並討論二氧化鈣薄膜的崩潰機制和可靠度，我們量測了二氧化鈣電容的崩潰電場和在負偏壓操作下的可靠度，即時間相關介電層崩潰測試(Time Dependent Dielectric Breakdown, TDDB)，並利用二氧化鈣場效電晶體結合載子分離的方法來了解其崩潰機制並加以討論。

6-2 二氧化鈣電容的量測結果與討論

圖 6-1 是 SC1 前處理和 RTO 前處理的二氧化鈣電容由 0V 掃到 -10V 時，閘極漏電流劇烈增加，即發生硬性崩潰(hard breakdown)時的崩潰電場統計分佈圖，崩潰電場是由 6-1 式的關係計算獲得：

$$E_{bd} = \frac{|V_{bd} - V_{fb}|}{CET} \quad (6-1 \text{ 式})$$

圖 6-1(a)的結果顯示 SC1 前處理未退火的二氧化鈣電容其崩潰電場較 RTO 前處理未退火的二氧化鈣電容高，經過 600°C 和 800°C 退火後 RTO 前處理二氧化鈣電容的崩潰電場反而較 SC1 前處理二氧化鈣電容高(圖 6-1(b)(c))。參考文獻[59]中指出，根據 6-2 式：

$$\varepsilon_{ox} E_{ox} = \varepsilon_{HfO_2} E_{HfO_2} \quad (6-2 \text{ 式})$$

當施加電場於絕緣層上時，二氧化鈣薄膜下方具有較低介電常數的二氧化矽將會比介電常數較高的二氧化鈣承受較高的電場，以其介電常數來看其電場大約相差 3~4 倍，因此他們相信這層二氧化矽在崩潰上扮演了主要的角色，但是在沒有作任何詳細的實驗和分析前，我們仍然很難明確地了解

崩潰的主要是發生在二氧化鉛或是二氧化矽，後續的 6-3 節對崩潰機制有詳細的分析和討論。此外我們可以發現不論是 SC1 前處理或是 RTO 前處理的二氧化鉛電容，其崩潰電場皆隨著退火溫度升高而下降。

圖 6-2 是二氧化鉛薄膜在時間相關介電層崩潰測試(Time Dependent Dielectric Breakdown,TDDB)下，其崩潰時間的韋柏圖，測試方式是採用負定電壓的方法，圖 6-2(a)顯示 SC1 前處理未退火的二氧化鉛電容在施加相同的電場下，其崩潰時間較 RTO 前處理未退火的二氧化鉛電容長，反之經過 600°C 退火後 RTO 前處理的二氧化鉛電容即使比 SC1 前處理的二氧化鉛電容施加更大的電場，但是其崩潰時間仍較 SC1 前處理的二氧化鉛電容長(圖 6-2(b))，而經過 800°C 退火後(圖 6-2(c))也是相同的結果，這和圖 6-1 二氧化鉛薄膜的崩潰電場有著相同的趨勢。

6-3 式是韋柏分佈公式，其中 F 是累計失敗機率(cumulative failure probability)， T_{BD} 是發生崩潰的時間， α 是當發生崩潰的百分比為 63.2% 時的崩潰時間， β 則是韋柏分佈的斜率：

$$F(T_{BD}) = 1 - \exp\left(\frac{-T_{BD}}{\alpha}\right)^{\beta} \quad (6-3 \text{ 式})$$

由 6-3 式知道當我們作 $\ln[-\ln(1-F(T_{BD}))]$ 對 $\ln(T_{BD})$ 的關係圖時，圖形將會是一直線，此直線的斜率就是韋柏斜率 β ，於是我們計算出了圖 6-2 中的 β 值並標示在圖上，SC1 前處理與 RTO 前處理未退火的二氧化鉛電容其 β 值分別為 1.29 和 1.26，而 SC1 前處理與 RTO 前處理經過 600°C 退火的二氧化鉛電容其 β 值分別為 0.85 和 0.74，SC1 前處理與 RTO 前處理經過 800°C 退火的二氧化鉛電容其 β 值分別為 0.82 和 0.87，我們發現經過退火後 β 值有下降的趨勢，文獻[60]提出造成 β 值下降的原因是因為在低電場時外質崩潰模式的影響，但是我們所施加的偏壓都大於 15MV/cm，因此似乎並不是外質崩潰(extrinsic breakdown)模式的原因，至於文獻[61]中提出軟性崩潰(soft breakdown)的 β 值會較硬性崩潰(hard breakdown)的 β 值低，並指出軟性崩潰主要是發生在二氧化鉛下方的二氧化矽，而硬崩潰則是主要發生在二氧化鉛介電層。圖 6-3 是時間相關介電層崩潰測試時其漏電流隨施加定電場時間

的變化情形，可以看出未退火的二氧化鈣電容(圖 6-3(a))並沒有軟性崩潰出現，而是直接發生硬性崩潰，至於經過 600°C 和 800°C 退火後的二氧化鈣電容(圖 6-3(b)和圖 6-3(c))，皆先發生軟性崩潰後再發生硬性崩潰，但是理論上由於這層二氧化矽厚度相當薄，因此載子利用直接穿隧穿過的機會較大，所以其崩潰機制應該主要還是二氧化鈣發生崩潰，而 6-2 節將利用場效電晶體結合載子分離的方法為此結論提供更有力的證據。

圖 6-4(a)和(b)分別是 SC1 前處理和 RTO 前處理未退火的二氧化鈣電容在施加定電場不同時間後的 C-V 曲線圖，我們發現隨著施加電場的時間增加其 C-V 曲線皆向左移動，這表示發生了電洞捕捉的現象，另外經過長時間施加定電場後其 CV 曲線並沒有發生變形(distortion)的現象，這表示電洞捕捉的現象主要發生在二氧化鈣中，而沒有額外的界面缺陷產生[62]。圖 6-5 是由圖 6-4 中計算出的平帶電壓對施加定電場時間的變化情形，可以看出隨著時間增加，平帶電壓偏移因為電洞捕捉的緣故逐漸增加直到填滿所有的缺陷而達到飽和，最後因為又產生新的缺陷所以使得平帶電壓偏移小幅增加。

圖 6-6 是 SC1 前處理和 RTO 前處理經過 600°C 退火的二氧化鈣電容十年工作期限操作電壓投射圖，圖中顯示 SC1 前處理經過 600°C 退火的二氧化鈣電容，其十年工作期限操作電壓約為-1.3V，而 RTO 前處理經過 600°C 退火的二氧化鈣電容，其十年工作期限操作電壓約為-2.5V。

6-3 利用場效電晶體結合載子分離分析崩潰機制

6-3-1 量測原理

其量測原理主要是利用金氧半場效電晶體(MOSFET)結構來進行量測，示意圖如圖 6-7，閘極的漏電流可以被分離出電子電流和電洞電流，矽基板量測到的電流為電洞電流(I_{sub})，而汲極和源極所量測到的電流為電子電流($I_{S/D}$)。

圖 6-8 顯示n型通道金氧半場效電晶體在負偏壓下的能帶圖，圖中源極電流(source current) J_s 代表的是穿隧過二氧化矽和二氧化鈣的電子電流，而井電流(well current) J_w 代表的是穿隧過二氧化矽和二氧化鈣的電洞電流，因此分別觀察電子和電洞電流在長時間偏壓下的變化，在負偏壓下 J_s 突增代表了二氧化矽崩潰，相反地 J_w 突增代表了二氧化鈣崩潰。表 3-1 列出了在n型和p型金氧半場效電晶體在正偏壓或負偏壓下，發生界面層(interfacial layer)崩潰或本體崩潰(bulk breakdown)時，其源極電流和井電流變化量之間的關係[63]。

6-3-2 結果與討論

圖 6-9 是二氧化鈣場效電晶體利用載子分離方法獲得電子和電洞電流對閘極電壓的關係圖，其中矽基板量測到的電流 J_w 代表的是由矽基板入射穿隧過二氧化矽和二氧化鈣的電洞電流，而汲極和源極量測到的電流 J_s 代表的是由閘極入射穿隧過二氧化鈣和二氧化矽的電子電流，由圖 6-9 我們知道在負偏壓下，電洞電流遠大於電子電流且幾乎等於閘極電流，因此在負偏壓下閘極電流主要是由矽基板入射穿隧過二氧化矽和二氧化鈣的電洞電流，實驗條件下也顯示相同的結果。

圖 6-10 是二氧化鈣場效電晶體在負定電壓下作時間相關介電層崩潰測試(Time Dependent Dielectric Breakdown, TDDB)的結果，我們利用了載子分離的方法得到了在長時定電壓偏壓下，電子和電洞電流對偏壓時間的關係，從圖上我們可以發現當發生崩潰時(閘極電流劇烈增加)， J_s (電子電流)大量增加，反之 J_w (電洞電流)並沒有大量增加，由表 6-1 和圖 6-8 我們知道只有當二氧化鈣發生崩潰時， J_s (電子電流)才會大量增加，另外實驗結果並沒有觀察到二氧化矽崩潰的現象，我們推斷電洞電流是以直接穿隧的方式穿過二氧化矽，穿過二氧化矽後以Fowler-Nordheim穿隧機制通過二氧化鈣，因此崩潰發生時電洞電流無顯著增加，實驗條件也是顯示相同的結果。從以上的結果我們可以推斷發生崩潰的機制如圖 6-11 所示，首先在負偏壓

下由閘極入射的電子和由矽基板入射的電洞在二氧化鉛中被捕捉，而被捕捉的電子和電洞加強了二氧化鉛的內部電場而導致二氧化鉛發生崩潰。

發生崩潰時是二氧化鉛崩潰，因此推論二氧化鉛退火後 β 值下降是因為發生結晶化且因為結晶化不均造成，至於二氧化鉛退火後崩潰時間縮短的原因是因為二氧化鉛結晶化造成晶粒邊界大量缺陷和斷鍵而使得二氧化鉛容易發生崩潰[64]。所以 SC1 前處理未退火的二氧化鉛電容，其崩潰電場和崩潰時間優於 RTO 前處理未退火的二氧化鉛電容，表示其二氧化鉛的品質較佳。但是經過退火後，由圖 3-4(b)和圖 3-5(b)以及第四章所得到結論，SC1 前處理經過退火後的二氧化鉛由於結晶情形較混亂，因此具有較多的缺陷，至於 RTO 前處理經過退火後的二氧化鉛結晶情形接近完美的複晶晶相，所以具有較少的缺陷，這說明了 SC1 前處理經過退火後二氧化鉛崩潰電場和崩潰時間皆較 RTO 前處理經過退火後二氧化鉛差的原因。

