

在氮化鎵上利用液相沉積法成長氧化鋁薄膜

石善宜、辛伯克、黃健峻、王永和*

國立成功大學電機資訊學院微電子工程研究所

yhw@eembox.ncku.edu.tw

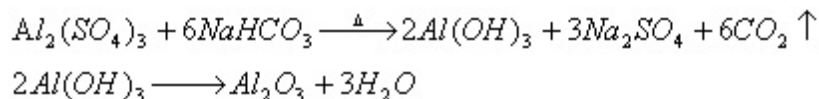
Journal of The Electrochemical Society, 154 (12) H1041-1046 (2007)

由於氧化鋁(Al_2O_3)擁有大的電子能隙 (~9 eV)，較高的介電常數 ($k=10$)以及高崩潰電場 ($5-10\text{ MV cm}^{-1}$)和良好的熱穩定性等優點，因此在動態存取記憶體(dynamic random access memories, DRAMs)以及金氧半場效電晶體(Metal-oxide semiconductor field effect transistors, MOSFETs)等應用上，已經逐漸取代二氧化矽(SiO_2)成為半導體元件的介電層材料。再加上因為氧化鋁的晶格常數和氮化鎵(GaN)較為匹配，且不必擔心二氧化矽中的矽擴散至氮化鎵($AlGaN$)和鋁發生反應，所以非常適合成長在氮化鎵材料上。

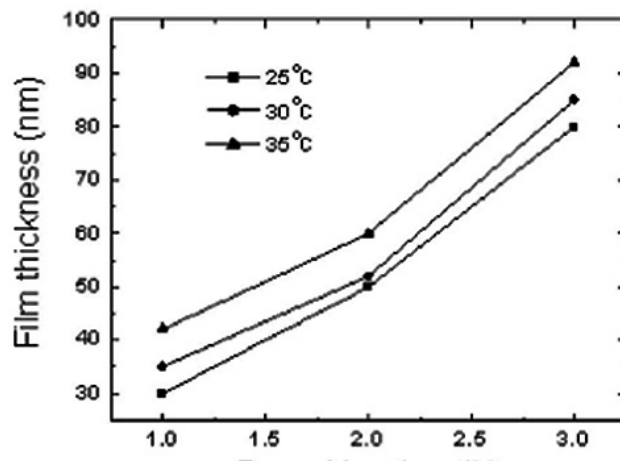
文獻上已經發表許多成長氧化鋁薄膜的方法，包括熱氧化法(thermal oxidation)、有機金屬化學汽相沉積法(metal-organic chemical vapor phase deposition, MOCVD)、濺鍍法(sputtering)、光冷卻熔溶態氧化鋁法(photoluminescent alumina films by pyrosol)以及原子層沉積法(atomic layer deposition, ALD)。但是上述方法都需要高的基板溫度($>750^\circ\text{C}$)，這會導致在氧化層和半導體表面之間產生熱變形以及缺陷，因而使得元件的特性下降。本研究著重在使用低溫液相沉積法成長三氧化二鋁於氮化鎵/氮化鋁鎵異質界面場效電晶體上以減少閘極漏電流。



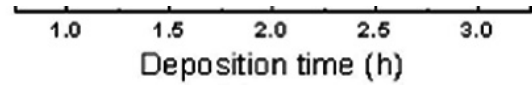
液相沉積法的製程相當簡單，它只需要一個恆溫水槽、鐵氟龍燒杯、酸鹼檢測計以及晶片支架即可。先將硫酸鋁 [$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$] 粉末放入燒杯中，加入少量水溶解，同時放入碳酸鈉($NaHCO_3$)粉末，再加入去離子水(DI water)使得PH值達到3.80為止，即可放入晶片加以沉積。最後硫酸鋁的濃度為0.0834 mol/L，碳酸鈉的濃度為0.211 mol/L，。其液相沉積化學反應式為：



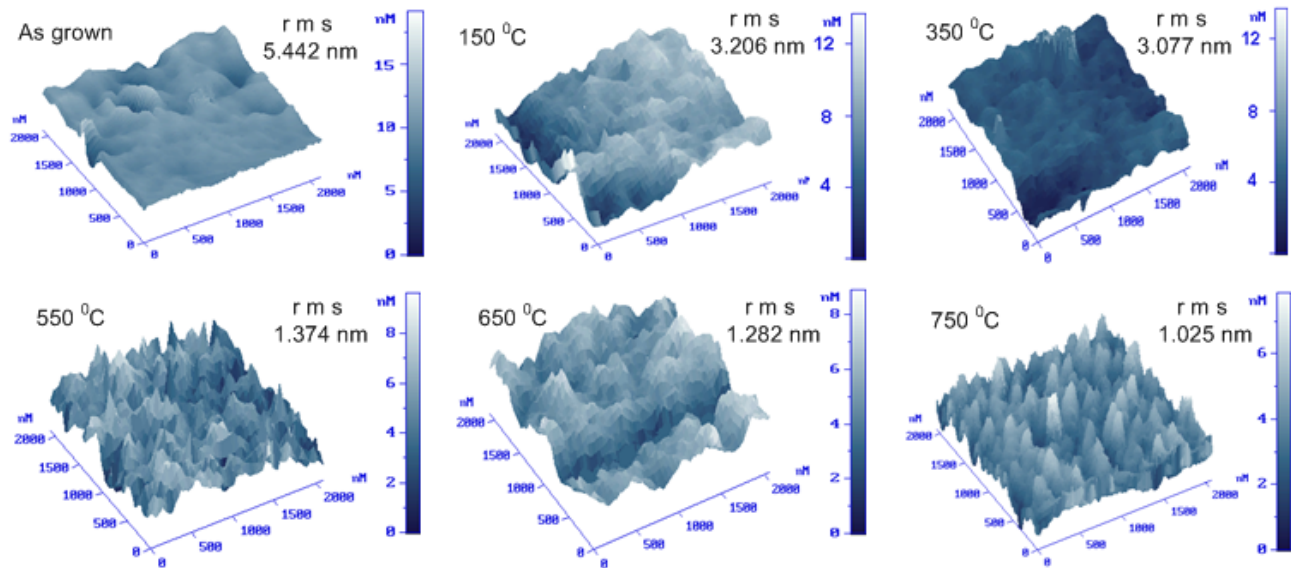
圖一為在不同溫度下，氧化鋁的沉積厚度。可以看出一至二小時的沉積速率跟二至三小時有極大的差異，這是由於溶液中的 $Al(OH)_3$ 聚集成大的膠狀粒子，導致沉積速率會比較快，同時溶液會變的較為渾濁。而由於 $NaHCO_3$ 的消耗，溶液的pH值也從原先的3.80降為3.67。而溫度跟沉積速率以及氧化層品質也有很大的關係。當溫度超過 40°C 以上，溶液會很快的變為渾濁，而其品質也較差。在不同的氧化層厚度下，折射率從1.5變成1.65。



而為了讓氧化層更為緻密，本篇採用不同溫度下進行熱退火處理，利用AFM儀器探討其表面粗糙度。圖二為不同熱退火溫度的氧化鋁表面粗糙度，在750 溫度下可以得到1.025 nm的表面粗糙度，遠比氧化矽的5.2 nm小。如此平滑的表面剛好適合用來當作氮化鎵場效電晶體的閘極氧化層。

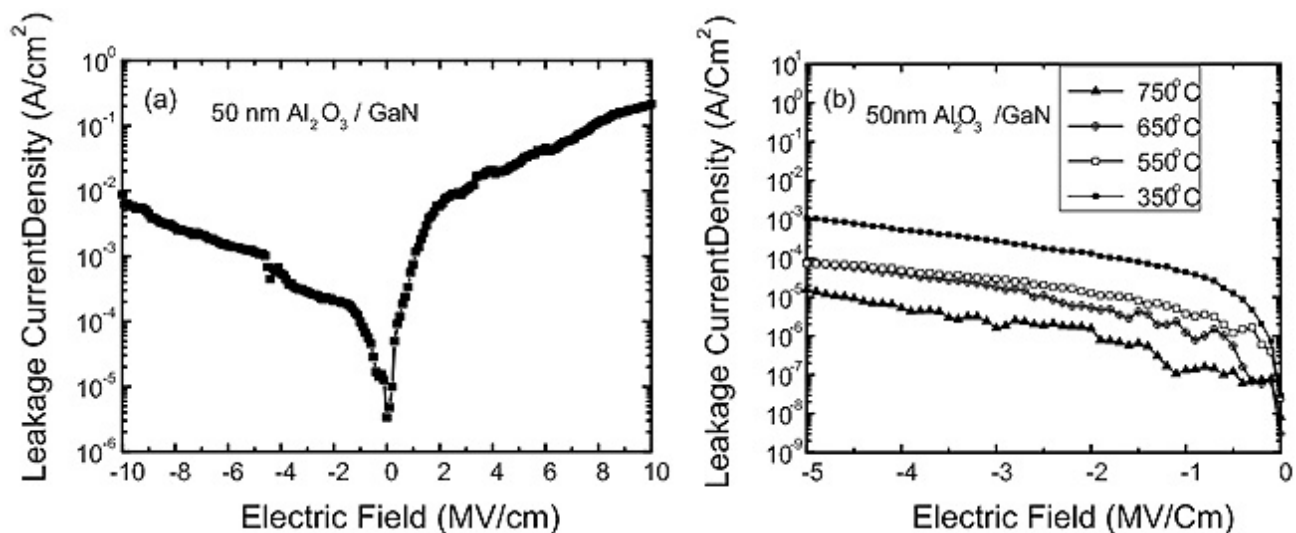


圖一 氧化層厚度跟沉積時間圖



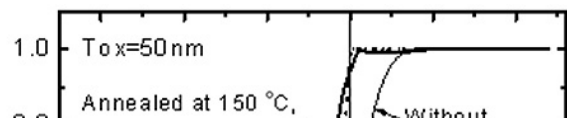
圖二 在氮氣環境使用不同溫度熱退火的氧化鋁表面AFM圖形

下圖三為成長氧化鋁閘極氧化層的漏電流分析。圖(a)為成長50 nm厚度的氧化層後，再進行30分鐘150 熱退火處理後的漏電流曲線圖，由圖可以看出在反偏電場1MV/cm下，漏電流密度為 10^{-4} 至 10^{-5} A/cm²；崩潰電場超過10MV/cm。圖(b)則是其它不同溫度熱退火的漏電流特性圖，在反偏電場1MV/cm下，漏電流密度為 10^{-6} 至 10^{-7} A/cm²。其漏電流特性都比二氧化矽成長在氮化鎵基板的特性更佳。



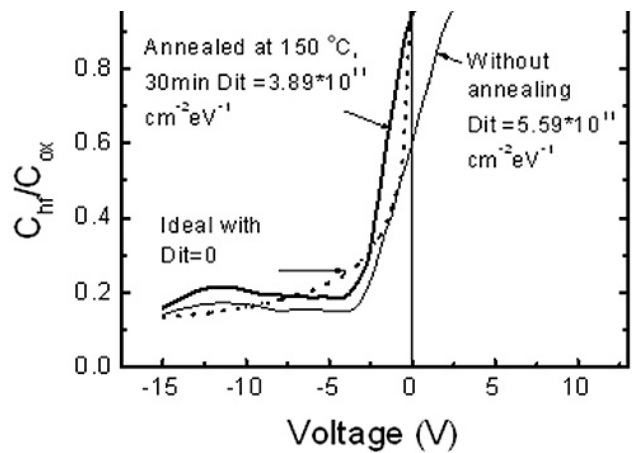
圖三 (a) 150 30分鐘熱退火後之電流-電壓曲線圖。(b)不同溫度下熱退火後之漏電流曲線圖。

圖四則為使用4280A在1MHz頻率下，所量測之電容-電壓曲線圖。圖中曲線分別為理想(無缺陷)、無



熱退火以及有熱退火兩種條件的特性曲線圖。根據公式 $D_{it} = C_{ox}/q [(dc_s/dV)^{-1}-1] - C_D/q$ 可以算出其缺陷密度以及平帶電壓(flatband voltage)，其中 C_{ox} 和 C_D 為氧化層以及空乏的電容，當 $c_s=0$ 時，其電壓則為平帶電壓。經由計算可以得到平帶電壓分別為 +2(無熱退火)以及 +0.2V(有熱退火)，而表面缺陷密度則為 $5.59 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 以及 $3.89 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 。發現經由熱退火後，有很明顯的降低表面缺陷密度。

本篇我們成功探討了利用低溫(約35)、低成本、高效率的液相沉積氧化法成長氧化鋁於氮化鎵基板上，所成長之氧化鋁之反射率為1.63，介電係數為9.7。經由AFM、電流-電壓以及電容-電壓曲線圖得知，熱退火後的氧化鋁薄膜很適合用來當作氮化鎵場效電晶體的閘極介電層。



圖四 氧化鋁薄膜成長在氮化鎵之電容-電壓特性曲線圖