

維基夥伴獎學金

成果報告

## 常溫下電子自旋極化現象之應用

研究者            電工系 103 級    錢偉臣

指導老師            陳建旭            博士

指導教授            李建平            教授

## 學習動機：

自旋電子學<sup>1</sup>是近年來在應用物理中相當熱門的主題。基於在現有的電子元件以電壓進行控制為大宗，但是有電流通過而耗電與漏電流的微縮技術瓶頸，讓研究開始朝向其他方向去尋找替代方案，以期能找到省電、速度更快的元件。

二十世紀末，以一絕緣體隔著兩塊磁性層(MTJ<sup>2</sup>)，揭示出改變電子自旋方向(磁極)達到控制電阻的方法(TSP<sup>3</sup>)。從此之後，以金屬跟半導體為基材來實現 TSP 的元件開始出現，更有自旋場效電晶體(spin FET) 及自旋金屬氧化半導體場效電晶體(spin MOSFET)的誕生。

幾年來不斷出現的 MRAM 藉由電壓改變兩磁性材料的磁極方向，磁極平行則電流通，反平行(anti-parallel)則電流極小，而使輸出訊號的大小能夠表示一個位元(bit)。該元件號稱速度媲美 SRAM，容量能夠達到 DRAM 的等級，世界各公司正努力突破大面積的 MRAM 製作(IBM、TSMC、Samsung)。

另一方面，為了善加利用電子自旋的特性，有研究朝向自旋的能階變化，進行自旋累積(spin accumulation)或注射(spin injection)的偵測(spin detection)。起初，使用蕭特基隧障(Schottky tunnel barrier)針對不同磁性物質對接面(如 FM/oxide/semi)量測，需要降溫至 100K 以下才行。在鐵磁與半導體間安置絕緣體，可有效讓電子通過時極性不發生偏轉，自旋資訊不至於消失。

近年由於在室溫下蕭特基隧障量測出有自旋累積的產生，後續的發展可望成功，故選擇此題目，願能從做中學，先能重現該元件的現象，再討論是否能夠改變製程使特性更佳。

## 學習狀況：

目前已通過奈米中心儀器濕式工作台(Wet Bench)的考核，並已討論一種流程(flow)能夠製作以矽為基底，長出蕭特基隧障的元件而能量測到不同磁場下自旋累積度的變化。過程中需要使用顯影技術，學習「光罩對準曝光機(DUV)」，目前已經試過鍍破片塗上光阻並成功蝕刻到出現圖案。

還認識了 E-gun 機台的操作方法，冷凍機搭配示波器量測樣品特性，LabView 軟體的控制程序的編寫，針對奈伏電表的訊號控制等。

---

<sup>1</sup> spintronics

<sup>2</sup> MTJ: magnetic tunnel junction

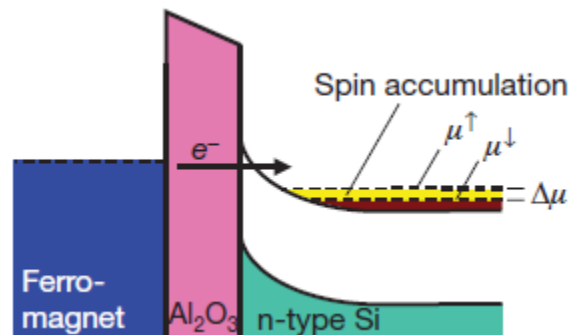
<sup>3</sup> TSP: tunnel spin polarization

## 實驗目的：

基於自旋電子學，在半導體中控制電子自旋的技術有望能影響現有的微電子科技。此實驗目的在於製造出能產生自旋極化現象並能控制電壓與電流的元件，且製作方式能與現有之半導體製程結合。

## 實驗原理：

考慮一磁鐵—三氧化二鋁—n 型矽的能帶圖(如下圖)，氧化層為高能障，而 n 型矽與氧化層間有蕭斯基障<sup>4</sup>，現有電子流從鐵金屬端透過穿隧效應流向矽端，而因為電子自旋的方向不同，而有不同的位能  $\mu^\uparrow$ 、 $\mu^\downarrow$ ，我們定義自旋的累積度為： $\text{accumulation} \equiv \Delta\mu = \mu^\uparrow - \mu^\downarrow$ 。



↑ 鐵磁物質的自旋方向經電流影響矽端位能差

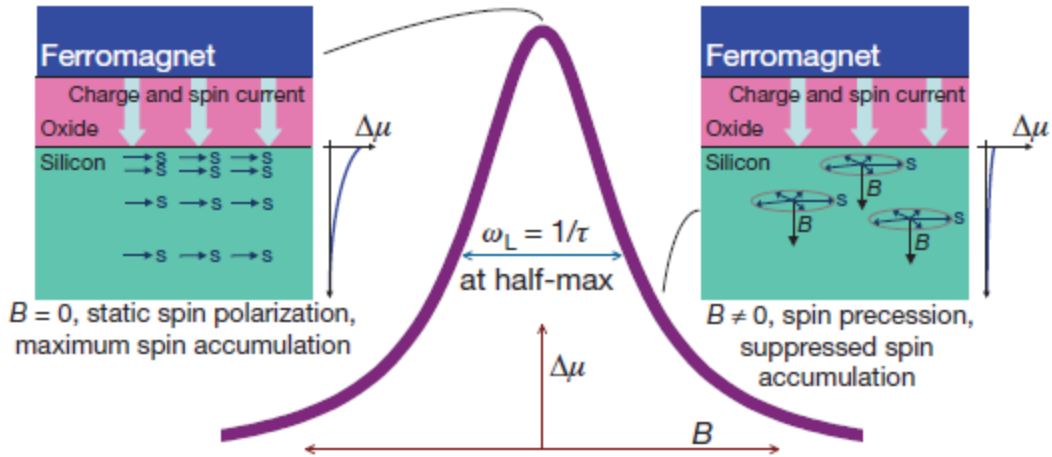
再來考慮外加磁場的情況，首先當磁場大小  $B$  為零時，自旋的極化保持恆定，自旋累積度為最大值；一但  $B$  不為零時，若磁場方向與自旋方向垂直，則會產生磁力矩差而使電子產生進洞現象，此進動的角頻率稱拉莫角頻率<sup>5</sup>，公式為  $\omega_L = g\mu_B B/\hbar$ ， $g$  是蘭德  $g$ -系數<sup>6</sup>、 $\mu_B$  是電子磁距、 $\hbar$  是普朗克常數除  $2\pi$ 。此現象發生後導致極化方向不固定，減少了自旋累積度。自旋累積度與磁場大小的關係變化為： $\Delta\mu(B) = \Delta\mu(0)/(1 + (\omega_L\tau)^2)$ ， $\Delta\mu(0)$  為無外加磁場情況， $\tau$  是自旋存活周期<sup>7</sup>，經由下圖，我們可以看到，當拉莫角頻率與自旋存活周期互為倒數，即該磁場強度下，自旋累積度達到最大值的一半。另須注意，自旋累積度亦與氧化層—矽接觸面距離有關，距離越遠自旋累積度越小。

<sup>4</sup> Schottky barrier(contact)

<sup>5</sup> Larmor frequency

<sup>6</sup> Landé g-factor

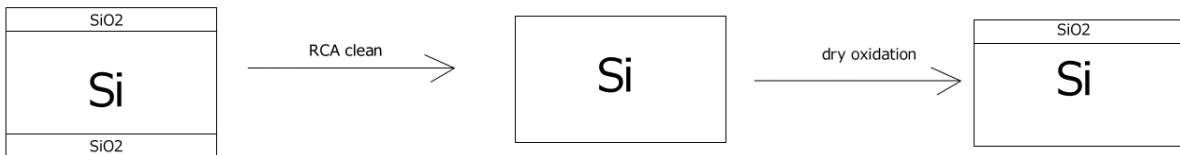
<sup>7</sup> Spin lifetime



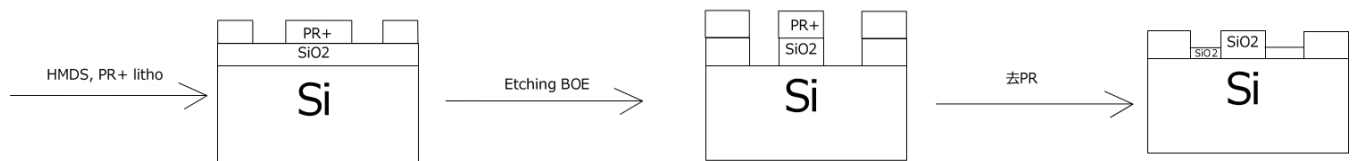
↑ 外加磁場使電子自旋的方向偏轉，遺失極化資訊

再定義 Spin-RA product，是自旋電阻( $\Delta V/I$ )與截面積 Area 的乘積，偏壓 $\Delta V$ 與 $I$ 分別是鐵磁材料與矽層電位差跟電流。改變施加偏壓 $\Delta V$ ，在正偏壓( $V_{Si} > V_{FM}$ )時為電子注射進矽層，負偏壓( $V_{Si} < V_{FM}$ )時，為電子從矽層釋出到磁鐵金屬層。

實驗步驟：



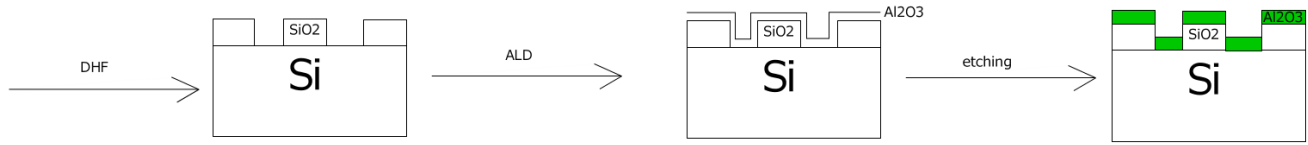
1. 矽晶選用(100)方向 n 型
2. 目前無 SOI wafer，則使用一般 Si layer 代替，量測特性大約溫度極限應不到室溫。
3. 乾式氧化長一層品質較佳的二氧化矽絕緣層。



4. 塗佈 HMDS<sup>8</sup>，矽製程需做此步驟，以免光阻無法順利固定在氧化層上。
5. 塗上正光阻，並光罩顯影。
6. 使用 BOE 溶液蝕刻

<sup>8</sup> Hexamethyldisilazane

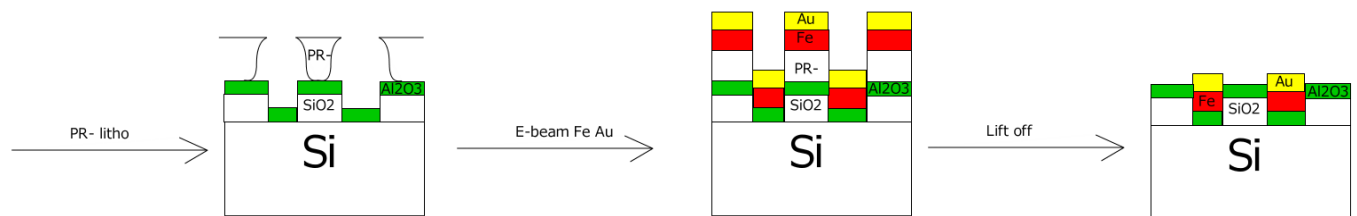
## 7. 去除光阻



8. 將去 PR 過程中產生的氧化層去掉

9. 抽真空( $10^{-7}$ mbar)，使用原子層級沉積法<sup>9</sup>，將 Al 鍍上(形成  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )約 0.5nm 厚的絕緣層薄膜。

10. 蝕刻谷邊緣沉積的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。



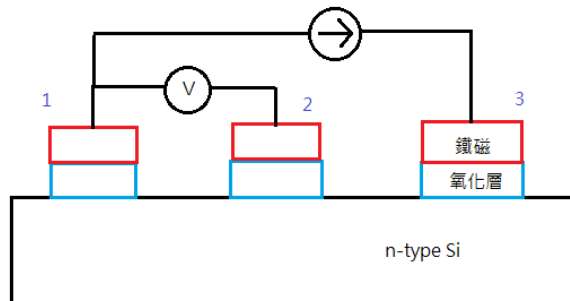
11. 塗上負光阻，再使用光罩顯影，製作出可讓金屬鍍上的區域

12. 使用電子束沉積法<sup>10</sup>(E-gun)分別鍍上磁鐵及金

13. 將金屬跟著光阻一起掀離(lift off)

14. 量測

a. 主要量測架設圖



b. 先將各端磁鐵極化至平行。

c. 在 1 端與 3 端接上穩定電流源  $I$ ，電流約 1mA，在 1 端與 2 端接一電壓計，測量電壓差  $\Delta V$  隨磁場強度之變化，並作圖。

d. 同 b.之設置，以不同的環境溫度下(10k、50k、100k、150k、200k、250k)，重複測量並作圖。

e. 使用公式  $\Delta V = \text{TSP} \cdot \Delta\mu/2$  計算  $\Delta\mu$  分佈，TSP(tunnel spin polarization)值使用 0.3

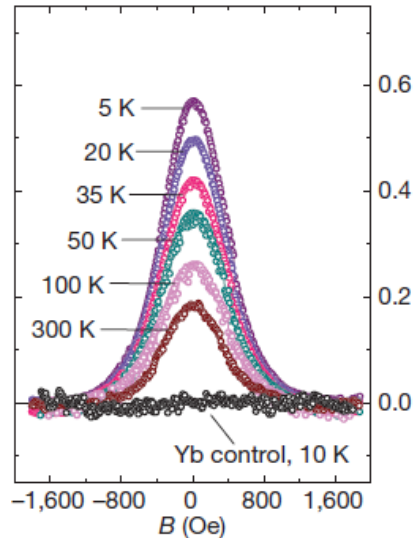
<sup>9</sup> Atomic layer deposition

<sup>10</sup> Electron-beam deposition

- f. 透過 $\Delta\mu$ 分佈計算自旋存活周期
- g. 再利用 $L_{SD} = \sqrt{D\tau}$ 計算自旋擴散長度
- h. 同 c.之環境溫度設置，施加偏壓 $\Delta V$ 計算出 Spin-RA product 分佈，探討其不對稱性

預期成果：

1. 自旋累積度對磁場強度圖形應是呈似鐘型分布，且溫度越小山峰越為陡峭：



2. 計算得出的自旋擴散長度，基本上應大於一般電晶體擴散長度( $L < 100\text{nm}$ )

透過 Spin-RA product 對 $\Delta V$ 的關係圖，歸納出相反的偏壓方向，呈現不同的特性

進度規劃：

暑假會有幾項目標需要完成：

1. DUV 光罩對準機的考核，顯影製程中需要曝光機和厚度探測儀。
2. 奈米中心黃光室的資格考核，因為 HMDS 塗佈機是黃光室機台，還需要資格才能使用。
3. 熟悉冷凍機及奈伏電表 2182 的操作使用。

下學期目標：

1. 開始製作樣品
2. SOI 材料的使用，期能得到更好的電性。
3. 若樣品量測失敗，歸納各種原因，調整製程，重新試驗。