

出國報告（出國類別：參加國際研討會）

## 參加國際亞洲磁學會議

服務機關：國立中正大學

姓名職稱：陳恭 物理系教授

派赴國家：中國 海口市

出國期間：2014/10/28-2014/10/31

報告日期：(2014/11/27)

## 摘要

鑑於亞洲學術研究風氣日盛，5年前開始召開國際亞洲磁性會議。此次國際亞洲磁性會議在中國海口市舉行，從10月28日開始為期4天，各國學者500多位參加，討論議題除學術外也有部分應用課題。會議期間，除大會演講外，有同時舉行的平行研討會達10項之多。本人獲得該會議邀請演講，報告有關本實驗室在多層磁性超薄結構的反鐵磁效應，以及變溫(10 - 300 K)時磁相變產生的狀態與發生的機制。其他參加會時間大多花在自旋電子學相關領域，收穫良多。目前亞洲型態的國際會議漸多，有與歐美分庭抗禮之勢，我國學術單位不妨注意相關發展，預先布局取得亞洲學術推動之主導地位。

目次	
目的	第 1 頁
過程	第 2 頁
心得及建議	第 4 頁
附錄	第 6 頁

目的: 接受該會議邀請演講並了解國際間自旋電子學之發展現況

### 背景介紹:

磁性薄膜的製作與其物理性質的分析，由於真空技術以及表面物理的突飛猛進，磁性薄膜的尺度現在可以準確的控制到 1 奈米以下，因此可以觀察到顯著的量子效應與介面效應。在這些現象之中最受到注意的主題之一是自旋電子學 (spintronics)。自旋電子學是電子學的延伸，如果在電子元件中除了電荷的自由度以外，也能掌握自旋的自由度，在理想的其況下將可以用自旋流來傳遞訊息，而達到快速、低能的最佳狀態。自旋電子學的發展始於 1986 年巨磁阻現象的發現，這項工作也因為推展硬碟記憶體的具體成果，於 2007 年獲頒諾貝爾獎。歷經 30 年，自旋電子學成為物理學們的重要領域之一，其方展方興未艾，以物質系統而論，包括半導體與金屬兩部分，而其中一條主要路線，為磁性隨機記憶體(MRAM)，可以藉由其發展一窺自旋電子學的究竟。

磁性記憶體(Magnetic Random Access Memory, MRAM)以磁性穿遂結多層結構為主體，其原理以磁滯現象對應的平行與反平行態的磁電阻差異作為零與一的區別，發展為奈米位元的高密度發記憶體。從最近文獻中對各式記憶體發展的記載可以看到 DRAM 及 Flash 記憶體的容量密度在過去十幾年來快速成長，但目前有逐漸飽和的趨勢。磁記憶體具有非揮發性、快速、低耗能等優點，近期已成為一個與其他記憶體互補的重要元件。

更值得注意的是在整個 MRAM 產業發展的過程許多新的科技逐步被發掘而出，譬如新的磁性結構以及不同的磁翻轉機制。在結構中以垂直異向性薄膜的使用，同時解決了尺度減小以及熱穩定度的問題最為重要。而磁翻轉機制則以目前發現不久的自旋霍爾效應同時解決了降低臨界電流以及防止電場損毀效應最為重要。

## 過程

本人於 103 年 10 月 28 日至 10 月 31 日赴中國大陸海南島海口市參加國際亞洲磁學會議「The 3<sup>rd</sup> International Conference of AUMS」與各國學者進行學術交流。此會議於 103 年 10 月 28 日至 11 月 2 日在海口市舉行，此會議除了有各國學者在學術上的研究分享外也有各項應用於科技的應用情形交流。大會除全體演講外另外也針對磁性、電磁學、微波等技術科技方面的相關議題進行分組演講，詳細議程請見附錄及網頁 <http://www.icaums2014.org/en/index.asp>。會中也邀請來自美國 Argonne National Laboratory Dr. Samuel BADER 對於自旋研究以及應用進行分享演講。此會議參加成員來自日本、韓國、台灣、印度以及中國等國，亞洲各國學者無不藉由此會議交流在磁性材料上的研究以及應用。

本人於 10 月 28 日(星期二) 下午 6 時抵達海口市會議場，並於 10 月 29 日 (星期三) 論文口頭報告。論文主題及報告時間如下：**14:20-14:45 \*A8-03，人工反鐵磁結構：MgO/CoFeB/Ta(x)/CoFeB/MgO 之探討**。本人發表的論文摘要如下：

垂直式人工反鐵磁以及自旋霍爾效應

### (1) 介面效應與上下結構

MgO/CoFeB/Ta 的垂直異向性是由於 Fe-O 的混價效應(hybridization)造成 Fe 電子分佈沿垂直方向的對稱遭到破壞而誘發，然而退火的過程同時也會讓 Ta 原子擴散而破壞鄰近的鐵磁層，我們的一項工作是發現介面的效應對於 CoFeB/Ta 與 Ta/CoFeB 有顯著的不同，前者的幾乎沒有死磁層，然而後者的死磁層~0.4 nm(退火 300 度)。這個發現對於垂直異向性的了解有很大的幫助，也對於製作 Ta/CoFeB/MgO/CoFeB/Ta 穿隧結有具體的實用意義。

### (2) 垂直式人工反鐵磁

人工反鐵磁(synthetic antiferromagnet, SAF)多層結構包含兩層鐵磁層經由中間隔著的非鐵磁層巨有反鐵磁耦合效應，水平式薄膜系統 SAF 廣泛的被應用於 MTJ 結構中以增加熱穩定性以及去除異常的 orange peel coupling，我們提出 MgO/CoFeB/Ta/CoFeB/MgO 的垂直式人工反鐵磁結構，並已經申請專利通過。

### (3) 電流驅動之磁翻轉與自旋霍爾效應的對稱性

自旋霍爾效應與對稱性有密切的關係，其等效場的方向決定於電流及磁矩方向，為了使等效場在垂直的方向必須在水平方向施加外場。最近的文獻提出以改變覆蓋層的厚度，引進水平方向對稱性的破壞而達到在無需施加外場的條件下，行使電流驅動的磁翻轉。在實驗上 UCLA 的 K. Wang 團隊製作楔形的 TaO 覆蓋氧化層，驗證了這個構想，對於電流驅動的工作有重大貢獻。不過未來在元件生產時，是否能重複覆蓋層精確的調控，仍將面臨嚴峻的挑戰。

為了要解決這個問題，我們採用多層鐵磁層的做法，而使得磁矩的水平對稱性破壞，也在最近成功的驗證了無需施加外場的條件下用電流翻轉磁區的效用。這些工作不僅對未來元件的操作極有意義，更對於未來場-流(H-J)所誘發的磁矩的改

變或相變，有很大的啟發。

10月30日(星期三)參加研討會，聽取其他學者發表論文，進一步認識其他國家學者研究領域以及目前的應用層面。

10月30日(星期四)上午持續參加會議，中午赴機場，搭機返國。

## 心得及建議

### 學術方面:

#### 1. 垂直異向性

由於形狀異相能的原因，一般薄膜系統中磁矩都是平躺在面上，選用  $L_{10}$  相的 FePt、CoPt 可以有效引進垂直異相性，然而要考慮高磁阻以及適當的矯頑場，超薄(<1.5 nm)的 Ta/CoFeB/MgO 藉由介面異相能，成為目前元件的首選材料。然而介面所產生的效應與製作過程有密切的關係，其中後退火提升薄膜的結晶性是關鍵程序，但退火會引發磁死層(magnetic dead layer)而導致磁性之減損，這些因素相互影響，導至於超薄 CoFeB/MgO 系列的製作十分複雜，非經過仔細測試與分析無法準確掌握這些鐵磁結構的性質。我們在過去幾年中對此系統投入大量心力，不僅對單層 CoFeB/MgO 得到了第一手得經驗以及完整的掌控，並延伸到許多有趣的多層結構。這些會議除了發表論文外也與多位學者討會相關實驗結果，其他實驗結果將逐次發表於其他期刊中。

#### 2. 電流趨動之磁翻轉(current-induced magnetic switching)

當磁位元的尺度減少到奈米等級，除了上述的熱穩定性降低之外，矯頑場增加成為高密度磁元件的主要問題。然而因為電流密度( $J=I/A$ )與元件尺度成反比，以電流趨動的翻轉模式取代磁場翻轉磁矩的模式則可以有效的避免此問題，而成為未來發展的主流議題。以電流產生感應磁場在物理上並不新鮮，然而以自旋極化(spin polarized)的電流來翻轉磁性層卻是一項嶄新的概念，也是在自旋電子學發展過程中結出來的一個亮麗果實。要產生自旋極化的電流須先破壞自旋的對稱性，第一個具體的方法首先由 Sloncnwski 提出稱之為自旋轉矩(spin transfer torque, STT)。其做法是讓電流通過鐵磁參考層(reference layer)而獲得自旋極化電流，隨即利用自旋電流尚未鬆馳之前來翻轉鄰近的鐵磁自由層(free layer)。這個構想隨即在隧道結(magnetic tunnel junction)實驗中獲得證實。

而另外一種較新的方式現在稱之為 spin orbit torque (SOT)則是用 Rashba 效應或自旋霍爾(spin Hall effect, SHE) 效應，藉由於鐵磁層介面的對稱性破壞，而在電流行進的垂直(transverse) 的方向產生有效的自旋流，在磁性薄膜結構如 Pt/Co/AlO 以及 MgO/CoFeB/Ta 中都相繼觀察到有效的電流驅動而引發的磁翻轉現象。就應用而言，STT 與 SOT 目前的臨界驅動電流的大小都是在  $MA/cm^2$  的量級，但 SOT 可避免 MTJ 直接招受到隧道結在高場下崩解的

缺失，以及本身的新穎性質，目前成為極受重視的物理議題。我們從 2013 開始投入 SOT 研究，目前與北京中科院物理所商討合作架構，計畫設計一些新的雙層鐵磁結構，研究 SHE 效應與顯著的無外加場下電流驅動磁性翻轉現象。

## 一般性建言:

此次國際亞洲磁性會議有各國學者 500 多位參加，討論議題除學術外也有部分應用課題，本人獲得該會議邀請演講，主要時間大多花在自旋電子學相關領域，收穫良多。目前亞洲型態的國際會議漸多，有與歐美分庭抗禮之勢，我國學術單位不妨注意相關發展，預先布局取得亞洲學術推動之主導地位。

## 附錄

### General Program

Date	Program
Oct.28	Onsite registration (9:00-18:00)
Oct.29	Opening ceremony (8:30-9:10)
	Plenary lectures (9:30-11:30), 3*(40+5min.)+break (20 min.)
	Symposia (13:30-17:00), Invited talk (25-30min.), Contributed talk (15-20min.), break (15min.)
Oct.30	Symposia (8:30-12:00)
	Symposia (13:30-15:30), Poster session (15:30-17:30)
Oct.31	Symposia (8:30-12:00)
	Closing Ceremony
Oct.31-Nov.2	Satellite Meeting

### Technical Program

#### Technical Subject Categories

#### 1. Fundamental Properties & Computational Magnetism [Download](#)

- a. Fundamental Magnetic Properties
- b. Ab-initio Calculations and Micromagnetics
- c. Spin Glasses and Frustrated Magnets
- d. Correlated System
- e. Superconductivity
- f. Emerging Topics

#### 2. Magnetoelectronic Materials and Effects [Download](#)

- a. Complex Oxides
- b. Multiferroic Materials
- c. Magnetoelectric Materials
- d. Half-Metallic Materials
- e. Ferromagnetic Semiconductors
- f. Organic and Carbon-based Spin Transport Materials

#### 3. Soft Magnetic Materials [Download](#)

- a. Crystalline, Nanocrystalline and Amorphous materials
- b. Ferrites, Garnets and Other materials

#### **4. Microwave Materials and Devices [Download](#)**

- a. High Frequency Materials
- b. Magnetodynamics and Ferromagnetic Resonance
- c. Thin Film Inductors
- d. Microwave and Millimeter Wave Materials and Devices

#### **5. Hard Magnetic Materials [Download](#)**

- a. Intermetallic and Other Hard Magnets
- b. Nanostructured and Composite Hard Magnetic Materials
- c. Rare Earth Transition Metal Borides

#### **6. Thin Films, Fine Particles, Nanostructures [Download](#)**

- a. Ultra-thin Films and Surface Effects
- b. Multilayer Films and Superlattices
- c. Patterned Films and Elements
- d. Magnetic Nanowires, Clusters and Nanoparticles
- e. Magnetic Recording Materials

#### **7. Functional Magnetic Materials [Download](#)**

- a. Magneto-optic Materials and Devices
- b. Magneto-elastic Materials and Devices
- c. Magneto-caloric Materials and Devices
- d. Magnetic Fluids and Separation
- e. Molecular and Novel Magnetic Materials

#### **8. Spintronic Materials and Devices a. MRAM [Download](#)**

- b. Spin Transfer Torque
- c. Domain Wall Devices
- d. Magnetic Tunnel Junctions
- e. Spin Effects and Injection
- f. Exchange Bias
- g. Magnetoresistance, Magnetoimpedance and Hall Effect
- h. Other Spin Transport

#### **9. Magnetic Materials Applications [Download](#)**

- a. Biomedical and Environmental Magnetics
- b. Motors, Generators, Transformers & Power devices
- c. Sensors, MEMS
- d. New Applications

#### **10. Magnetic Imaging and Instrumentation [Download](#)**

- a. Magnetic Microscopy and Imaging

- b. Synchrotron Studies
- c. Processing and Characterization of Materials
- d. Magnetic and Structural Measurements and Instrumentation

**11. Emerging Magnetic Materials** [Download](#)

- a. Meta-Magnetics and Materials
- b. Skyrmions
- c. Emerging Topics

**12. Forum of Magnetic Materials and Their Industrial Applications**