

使室溫自旋電子元件早日問世

金重勳 逢甲大學 講座教授

成大電機系70級博士班



成就歷程

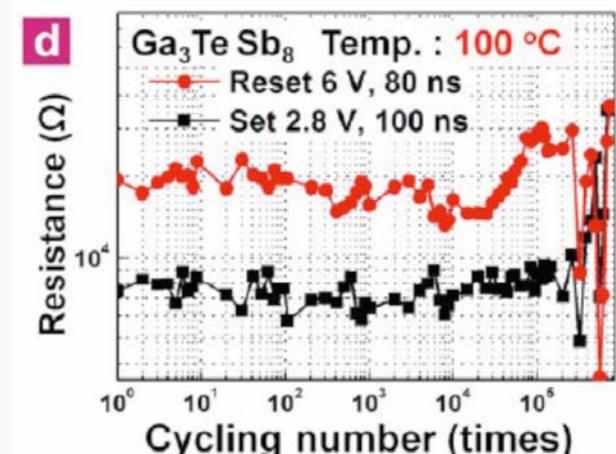
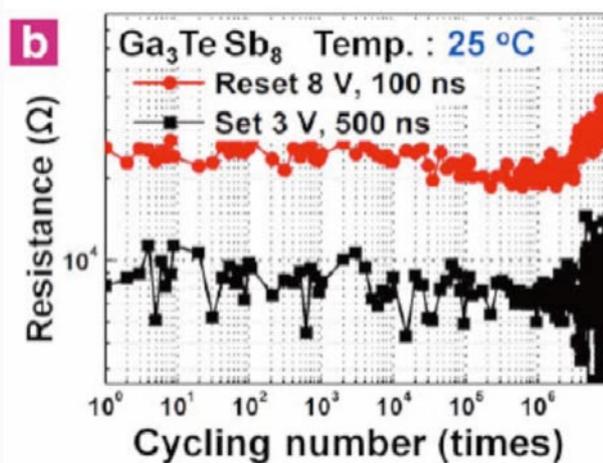
金重勳自民國62年由成大礦冶及材料科學所畢業、服完兩年兵役，64年10月進入工業技術研究院、金屬工業研究所服務六年。工作三年後想要繼續在國內進修。當時台灣各大學工程方面的博士班只有土木、機械、電機、化工四類，經審慎考慮後，決定轉行念電機。遂於67年9月進入成大電機所，以在職進修方式攻讀博士，師事吳添壽教授、張俊彥教授。70年12月通過校內博士口試，依規定當時尚須等候教育部的國家工學博士口試，於71年5月取得之。70年8月起他轉任成大冶金及材料工程系講師，71年5月後轉為副教授。75年取得國科會第二屆傑出研究獎，送審當時還是副教授。此事受到清華大學極大注意，屢次敦請，遂於77年2月轉往清大任教，直到96年7月退休為止。由於在創新材料科技於磁性技術、生醫、超導、光學記錄等研究上的成果，總共榮獲四次國科會傑出研究獎（每次兩年）、兩次國科會特約研究員獎（每次三

年）、國科會傑出特約研究員獎、中華民國工程師學會傑出工程教授獎、侯金堆傑出榮譽獎、獲選為俄國亞太材料學院 會員、中國材料學會會士等榮譽。他自71年到100年共發表SCI期刊論文327篇。茲將金重勳近十年來代表性的研究簡述如下。

A. 在非揮發性相變型記憶體上的研究

A1. 設計、開發溫度穩定性很高的新式 GaTeSb 相變記憶體

記憶體是IC產業的主力產品之一，約佔台灣IC產值20 % 左右。2008年世界經濟衰退，記憶體市場推估為578億美金（約兩兆新台幣），其中DRAM佔一半(但衰退16%)、非揮發性記憶體中的NAND-Flash則逆勢成長14%。因此，世界主要IC廠商莫不傾全力投入新世代記憶體的研發。台灣IC產業以代工為主，故未跟進。前年起DRAM單價慘跌，使得我國記憶體業淪為艱困產業行列。新式記憶體研發與產製對我國而言



已經刻不容緩。雖然除一家公司外，其他廠商仍不願積極投入（仍只願依賴技術授權），但身在學術界責無旁貸。非揮發性隨機存取記憶體(Non-volatile random-access memory)是近十年來非常熱門的研究。在諸多競爭性技術中，如鐵電記憶體FeRAM、磁阻記憶體MRAM、電阻記憶體RRAM、高分子記憶體pRAM、相變記憶體PRAM中；PRAM是目前進展最快者，Samsung、Numonix (Intel投資)兩大公司已於2009推出1 Gb、512Mb的產品，其寫擦速度快達四十奈秒(ns)以下，可直接取代NOR-Flash（寫擦速度以微秒計）。研發中的PRAM還往同時取代DRAM（隨機動態存取記憶體，揮發性但極快速，約30 奈秒）與Flash（非揮發性且大容量，但速度極慢）的所謂「統一記憶體」(Universal Memory) 方向大幅前進；IBM與Ovonyx在這方面著力甚深。

相變記憶體PRAM的原理是利用非晶（高電阻態）與其結晶（低電阻態，為前者的百萬分之一）間的快速相變化。在上述大公司開發的PRAM元件中，所使用材料都是Ge₂Sb₂Te₅（以下簡稱GST225），它也是二十年前為開發DVD-RW光碟所開發出來者，因此全世界對它的瞭解最深，本實驗室也做了很多（論文與專利）。但是GST225有一個致命傷—熱穩定性不佳：因為結晶溫度Tx才約160°C而熔點高達 630°C。全世界莫不孜孜於提高其保存溫度達到100°C可存放十年而數據不消失，方法都在GST225內添加可使Tx提高的第三、第四元素（如氧、氮、矽等）。

本實驗室提出新物系GaTeSb，並一系列地設計新成分如Ga₃Te₂Sb₁₂、Ga₂Te₃Sb₅等，後者可在161°C（GST225之Tx）之下保存十年、操作速度最快可達20ns，比DRAM的30ns還快，重複寫擦次數5x10⁵次以上。

本文被Advanced Materials期刊接受刊登：“Ga₂Te₃Sb₅ - a candidate for fast and ultra-long retention phase change memory”，Advanced Materials, 21, 1-5 (Jan 2009)。本論文刊出後，NPG Asia Materials 還特別專文報導。已經提出多國專利申請，目前已獲得美國專利審查通過。

金重勳實驗室更以材料設計，開發出新式Ga₃TeSb₈成分，室溫下可以操作達10⁷次以上（實驗停止），更可在100 °C恆溫下正常操作達3x10⁵次（見下圖）；保存十年的溫度達210°C。這些成果更是文獻所未見！要知世界各大公司及研究群，皆戮力於研究如何將十年保存溫度提升到100°C，而不易得，更遑論可高溫操作。

A2.創新共晶型新式非揮發性記憶體

國科會2007年為推動「革命性」新技術與新服務的研發，以創造台灣經濟下一波跳躍式發展的原動力，公告推動「台灣前瞻」(Taiwan Foresight) 計畫，邀請中研院王佑曾院士主持。一時引起各校重視而紛紛提案。經積極遴選後包括本人的共有八項計畫獲得支持。

本研究在於開發全新而還不存在的所謂ERAM

(Eutectic RAM)。它屬於快速、非揮發性記憶體的世界性新構想。與過去GST225或前述Ga₃TeSb₈等的差異在於，過去學者認為PRAM必須在單相非晶與其單相結晶間轉換，速度才夠快而可靠；一旦相分離就會變慢而且系統不可靠。IBM因此而放棄其發明之Ge-Sb材料。ERAM的材料設計準則，在於限定只用IC前端製程常用元素Si、Ge、Al、Cu等。若然，將會遇到許多共晶物系。金重勳大膽預測共晶相變雖然在塊體內發生時速度不快，但如果將物系侷限到奈米尺度(如200 nm以內)因擴散距離極小應該非常快速。且共晶反應是熱力學安定的反應，過冷液體(非晶)與共晶結晶間應有可逆性。才大膽提案、小心研究。

本計畫於去2008年底結束，金重勳研究小組達成非常豐碩成果，最高操作溫度可達160°C(為標竿GST225材料之結晶溫度)、數據儲存10年的溫度高達180 °C。這在非揮發性記憶體研究上是一個劃時代突破。

綜合上述「非晶-奈米晶」非揮發性記憶體，本實驗室研發出的Ga-Te-Sb基PRAM與新創的ERAM實為革命性的記憶體，為低迷的國內電子記憶體產業，預先作了革新的專利佈局；有機會對未來我國記憶體產業發揮巨大影響！

B.塊狀非晶合金與塊狀奈米晶合金的研究成果

B1. 設計驗證三元鐵基合金可做成塊狀金屬玻璃-世界首創

塊狀金屬玻璃(Bulk metallic glasses, BMG)指藉著簡單噴鑄設備，可以將熔融金屬鑄造成直徑1 mm以上的非晶態玻璃。困難度很高，尤以鐵基為然。下面將鐵基塊狀非晶在科學/工程上的問題，國際間的解決方案與成果、本研究方案與成果列表比較，希望能讓審查委員更易明瞭。問題：鐵基塊狀非晶在科學/工程上的問題所有合金系中最難形成大塊非晶者國際間的解決方案與成果本研究的解決方案與成果

Inoue的BMG設計準則：

1. 含有三種以上元素，通常四到八種，但Fe含量太低、結構用途可，而磁性低下，無法作磁性應用
2. 主要大/小原子的尺寸差異12%以上
3. 主要元素間要有很大的負混合熱。

成果：Fe_{43.7}Co_{7.3}Cr_{14.7}Mo_{12.6}C_{15.5}B_{4.3}Y_{1.9}七元成分可噴鑄10 mm直徑的高強度BMG (J. Pan, J. Alloys Comp 463, 246, 2008)；但鐵鈷含量低非作磁性用途。

金重勳的合金設計準則：

1. 限定只能用三個元素、選定Fe-B系，外加一個元素R；
2. R原子直徑是鐵的130%以上，且
3. R與鐵、硼皆為共晶系；排除活性太強的鹼

/土金屬。結果在週期表中只能找到Sc、Y、Dy、Ho、Er。

成果：實驗發現Fe-R-B (R= Sc, Y, Dy, Er)確可噴鑄成至少1 mm直徑BMG。Fe-Y-B的一些成分可噴鑄至少2 mm，且軟磁性極為優越！

本研究創新FeYB合金的特性：飽和磁化量1.52 T以上、電阻率是矽鋼片五倍多、傳統鐵基非晶薄帶兩倍多、矯頑磁力低達 4 A/m的軟磁合金；製成厚帶還可更提高磁性及電阻，將更適用！

本研究創新FeYB合金的用途：磁性應用，可旋鑄成非晶厚帶 (0.1 ~ 0.2 mm)，以克服目前變壓器用非晶薄帶 (0.025 mm) 的諸多缺陷 (需六片當成單片纏繞、工藝難度極高，且片與片間有空隙，使疊積密度低等等)。這在高頻、高功率、切換式變壓器上將有很大的應用潛力。

B2. 建立合金設計準則使塊狀非晶得以輕易退火成塊狀奈米晶

本研究設計在BMG內添加一被我稱為「主要合金元素」(PE)者、是主導非晶形成能力 (Glass forming ability, GFA) 的主角。PE含量越高使玻璃轉換溫度(T_g 點)下降、結晶溫度(T_x)上升 (亦即GFA升高)。PE在主要結晶元素內無或極低固溶度。於奈米結晶時，主要元素(如 α -鐵)結晶後，釋出PE於其周遭，逼使其周圍 T_x 上升，故因結晶導致的溫度上升，不會影響周圍非晶基地結晶，這使奈米晶不會長大，可以藉一般退火方式將BMG製作成大塊奈米晶合金的方

法。本法一舉克服在BMG退火過程，奈米晶一出現就快速成長變成微米晶的困難。由於此一重大突破，這篇文章被Materials Today收錄 “Bulk nano-crystalline alloys”，Materials Today, 12, 34-39 (2009)。該刊2008年Impact Factor 高達12.929。

B3. 首創以分子動力學模擬預測可形成塊狀非晶的、「新」成分

金重勳實驗室首創以分子動力學計算合金成分的非晶形成能力(GFA)。其採取的是D. Turnbull 於1980年代揭櫫之GFA準則： T_g/T_l 越大GFA越強(T_g : 玻璃轉換溫度、 T_l 液相線溫度)；過去對BMG合金的實驗表明 $T_g/T_l > 0.5$ 才有機會形成BMG。因此金重勳嘗試以具有「Tight-Binding Potentials」(TBP)的元素所組成合金，任意設定元素比例，以四千顆原子，在室溫下排列成晶體，然後升溫、直到2000 K，然後劇冷到室溫，在任何瞬間都可以由電腦取得當時的體積與個別原子位置，可以計算以任一原子為中心的Radial Distribution Function (RDF)，解析結晶與非晶結構。由降溫時體積的變化可以求得 T_g ，用所發展的方法求得的 T_g 與文獻中的實驗值非常接近，通常在5%以內。但是 T_l 誤差很大，通常在10~30%間。接著改以 T_s (固相線)溫度則較接近實驗值。經計算文獻中的物系，發現是可行的。接著試著計算文獻中從來沒有過的二元合金系，Ti-Co。文獻中的Ti基BMG都是四到八元，沒有三元以下者。計算結果發現有兩個組成具有高的

GFA。接著進一步實驗驗證，這兩個組成的確可以噴鑄成功1 mm直徑的BMG。過去BMG成分是无法「計算」出來的，都是經由大量實驗取得。

C. 在磁性半導體研究上的成果

C1. III-V族與II-VI族稀磁性半導體

在國科會國家奈米計畫長期支持，金重勳主持的「奈米磁技」歷經八年，開發稀磁性半導體(Diluted magnetic semiconductor, DMS)。整合清大物理系、化學系、材料系、工程與系統科學系總共八位教授，在III-V族(Ga, Mn)As薄膜、居裡溫度甚高於室溫的(In, Mn)As量子點及II-VI族(主要是ZnO) DMS新材料與準元件研究上成果非常豐碩。包括理論上的突破與許多實驗上的進展。

C2. 摻雜非晶矽 - 異常霍爾效應溫度在磁性半導體中最高

國家奈米計畫的DMS研究結束後，金重勳轉為以國科會個人型計畫繼續研究。這兩年來有感於全世界DMS廿年來因走III-V族與II-VI族系統的路，且過了高峰、已經有逐漸式微的現象。主因是他們所做與主流IC系統的四族元素相隔越來越遠。因此，金重勳的研究小組在國家計畫最後兩年，改作IV族的矽。但矽能固溶的過渡金屬非常有限，無法達到DMS的需求。全世界都在嘗試各種方法將磁性原子加進矽晶內(包括離子佈植)，金重勳毅然決定作非晶矽，因為非晶結構具有自由體積，能溶入大量溶質。雖然已經有理論計算的人發表論文說非晶矽(a-Si)的DMS不具有高 T_c ，仍努力將Cr、Mn等元素加進a-Si，並

且加氫以對付游離鍵。經過一年多的努力，發現a-Si(Cr):H具有高於室溫的居理溫度(T_c)，且在5 K量到其異常霍爾效應。這是全世界矽基DMS研究上的里程碑：“Room temperature diluted magnetic semiconductors based on Cr-doped amorphous silicon films”，Appl. Phys. Lett., 92, 242501 (June 2008)。這一發現受到NPG Asia Materials 2008/08/19專文報導。

2010年更進一步在 T_c 高於室溫的a-Si(Mn):H樣品中，經低溫退火製程做到異常霍爾效應(AHE)高達300 K，且再現地量測到；以其完全與現有IC工業相容的特質，希望使室溫自旋電子(spintronics)元件早日問世。

金重勳

生日

民國37年10月18日生

學歷

國立成功大學冶金及材料工程系 學士 (60級)

國立成功大學礦冶及材料科學所 碩士 (62級)

國立成功大學電機工程所 博士 (70/12)

中華民國國家工學博士 (71/5)

經歷

工業技術研究院 金屬工業研究所 副研究員、研究員 (64/10-70/7)

國立成功大學材料科學工程系所 講師、副教授、教授 (70/8 ~77/1)

國立清華大學材料科學工程系所 教授 (77/2-96/7)

國立清華大學 講座教授 (92/8-96/7)

國立聯合技術學院、國立聯合大學 校長 (90/11-93/7)

國科會工程處 材料學門 召集人 (88/1-90/12)

現任

逢甲大學 講座教授 (97/8-迄今)