



# 2024「中技社科技獎學金」

## 2024CTCI Foundation Science and Technology Scholarship

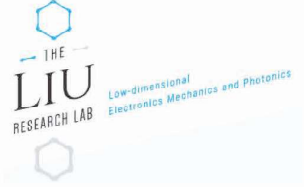
### 研究獎學金 Research Scholarship

#### Utilizing monolayer transition metal dichalcogenides to pioneer post-Moore's Law semiconductor devices

#### 運用單層過渡金屬二硫化物開創後摩爾時代的半導體元件

國立清華大學 光電暨工程研究所博士班五年級 李威慶

指導教授：劉昌樺教授



國立清華大學  
NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

#### 研究重點

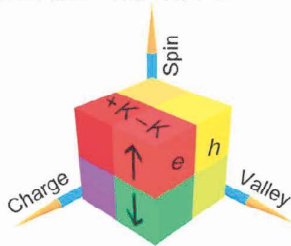
摩爾定律(Moore's Law)的提出,對半導體技術的發展起到了關鍵作用。但隨著技術的進步,摩爾定律面臨了一些困境,像是微縮面臨物理極限,晶體管密度帶來了高的功耗和嚴重的散熱問題等<sup>1</sup>。到目前為止,在矽基場效電晶體(FinFET)和閘極全環式電晶體(GAAFET)的幫助下,摩爾定律得以很好的被延續,但在不久後的將來,還是會再次面臨相同的問題,目前的半導體行業仍在探索多種可能的途徑來繼續推進性能提升。這包括通過先進封裝技術、新材料以及全新的計算架構。而其中,有兩種辦法得到許多人的支持,從而被廣泛地研究與討論。

1. 能谷電子學(Valleytronics): 能谷電子學提供了一種新的資訊自由度—能谷自由度。這意味著,在不改變現有晶體管尺寸的情況下,可以透過利用不同的能谷來增加信息存儲和處理的能力,從而提升晶片的效能<sup>2</sup>。

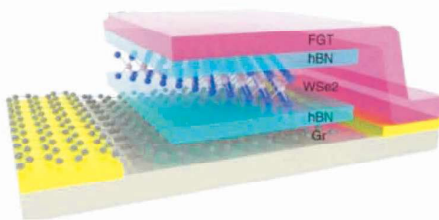
2. 非線性電漿子電路: 電漿子可以在非常短的時間內對外界激做出響應,這意味著它可以實現非常快的開關速度。這種高速開關特性有可能提升電路的整體性能,且電漿子本身具有強烈的非線性響應,可以用來實現複雜的電路功能,如倍頻、放大和脈衝整流等<sup>3</sup>。

然而,傳統材料由於缺乏明確的能谷結構,很難實現穩定的谷極化。此外,傳統的非線性光子材料具有低非線性敏感度和相位匹配等問題,加上大的塊材面積,使它們不易與晶片電路整合,導致應用上的困難。

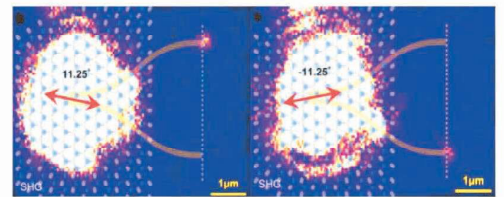
而二維材料的發現,再次給了研究人員看到解決問題的曙光,被視為是突破物理極限並取代矽等傳統半導體材料的潛力新星。二維材料具有極薄的結構,這使它們在電子設備中占用更少的空間,符合現今微縮的趨勢。更重要的是,二維材料僅依靠凡得瓦爾力連結,不會有傳統材料晶格不匹配的問題,可以輕易和其他二維材料或是任何基板相互整合成各種元件平台。而其中,過渡金屬二硫化物(transition metal dichalcogenides, 簡稱TMDs)是非常重要的一類材料,單層TMDs因為晶體結構而擁有超強的能谷自由度<sup>4</sup>,此外TMDs材料因為晶體結構缺乏反演對稱性也展現了非常強的非線性光學特性<sup>5</sup>。由於這些特性,TMDs 可以提供能谷自由度,不同於傳統的電荷與自旋,能谷自由度提供一種新的編碼與資料儲存方式,且擁有強的非線性光學特性,可整合到非線性電漿子電路內,將有機會大幅提升資料運算量、資料傳輸量、與資料存取量。



能谷電子學所擁有的載子自由度<sup>6</sup>。



電控式能谷極化發光元件示意圖。



當雷射場以不同角度偏振時,2ω SPP被路由至不同輸出埠。

#### 研究成果

在我的碩博士期間,我利用了TMDs 這些獨一無二的特性,設計了兩種新穎光電元件:

1. 電控式能谷極化發光元件: TMD 材料具有相當好的能谷特性,是能谷電子學發展的核心材料,然而過去人們大多使用光學控制的方式去控制TMD材料的能谷特性,能谷的電控制一直是人們未能克服的一大技術難題。但未來若將材料能谷特性整合進晶片或電子電路中,能谷的電控制是必須要克服的。因此我將二維過渡金屬硫屬化物二硒化鎢(WSe<sub>2</sub>)、二維鐵磁性材料Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub>(FGT)與其他半金屬或絕緣體材料結合,開發新穎的材料架構並進行能谷相關光發射器應用。將FGT當作自旋載子的輸入源,透過控制FGT內載子的自旋方向,進一步控制注入WSe<sub>2</sub>中的載子自旋,配合WSe<sub>2</sub>的能谷特性,實現電控式能谷極化發光元件。我們的結果可以解決能谷電子學的關鍵挑戰,提供全新的編碼方式,為解決未來大數據處理、量子運算、5G 通訊與資料存取帶來新的希望。也證明凡德瓦爾鐵磁體在磁光電子學應用中的可能性。該結果2022年刊登於國際頂尖期刊*Nature nanotechnology* 並獲選為七月封面。

2. TMDs 結合電漿子奈米電路: 二維TMDs材料由於其特殊晶格關係,使得空間上存在反對稱性缺失,從而自然產生了強大的倍頻能力。因此我們將二維過渡金屬硫屬化物二硒化鉬(MoSe<sub>2</sub>)整合到功能性電漿子奈米電路上,實驗性地展示了一種高效的非線性混合光子奈米電路。來自單層MoSe<sub>2</sub>的 SHG 訊號被有效地耦合到基於電漿子架構的兩線傳輸線(TWTL)奈米電路中。此外,TMD產生的 SHG 偏振依賴性與電漿子電路的獨特偏振選擇性路由功能無縫混合。我們使用了TMD材料大大增強了非線性光學轉換效率,並實現相干控制。透過對激發雷射的線偏振角進行簡單控制,可以輕鬆實現二次諧波 SPP 佈線方向,為實現 SHG 的高效相干控制提供了一條有前途的途徑,從而充分發揮 TMD 材料在非線性整合光子學中的潛力。

#### 得獎心得

感謝中技社的肯定,能夠獲得這項研究獎學金是我的榮幸,感謝指導教授劉昌樺老師的支持和建議,讓我在研究過程中不斷進步。這項獎學金不僅是對我過去努力的肯定,更激勵我在未來的研究中保持創新精神,持續探索新知。期許我的研究能夠對相關領域有所貢獻,並為未來的學術發展盡一份力。

1. Waldrop, M. M. The chips are down for Moore's law. *Nature News*, 530(7589), 144. (2016).  
2. CAO, Tang, et al. Valley-selective circular dichroism of monolayer molybdenum disulfide. *Nature communications*, 2012, 3:1-887.  
3. Zhou, F., & Du, W. Ultrathin all-optical plasmonic graphene modulator. *Applied Optics*, 57(23), 6645-6658. (2018).  
4. Li, Fang, et al. Interface engineering Modulates Valley Polarization in MoS<sub>2</sub>/hBN Heterostructure. *Nanotechnology*, 13:5 (2022), 961.  
5. Santos, Gabes, et al. "Optical harmonic generation in monolayer group VI transition metal dichalcogenides." *Physical Review B* 98:11 (2018): 118-08.  
6. Liu, Yunting, et al. "Valleytronics in transition metal dichalcogenides materials." *Nano Research* 12 (2019): 2095-2111.