

# Spin dynamics based on spin transfer torque and spin-orbit torque

김을중

## Introduction

스핀트로닉스는 전자의 스핀과 전하 상태를 이용하는 전자공학으로, 이를 이용하는 소자는 기존의 전자소자보다 높은 에너지 효율성과 데이터 처리 속도를 제공

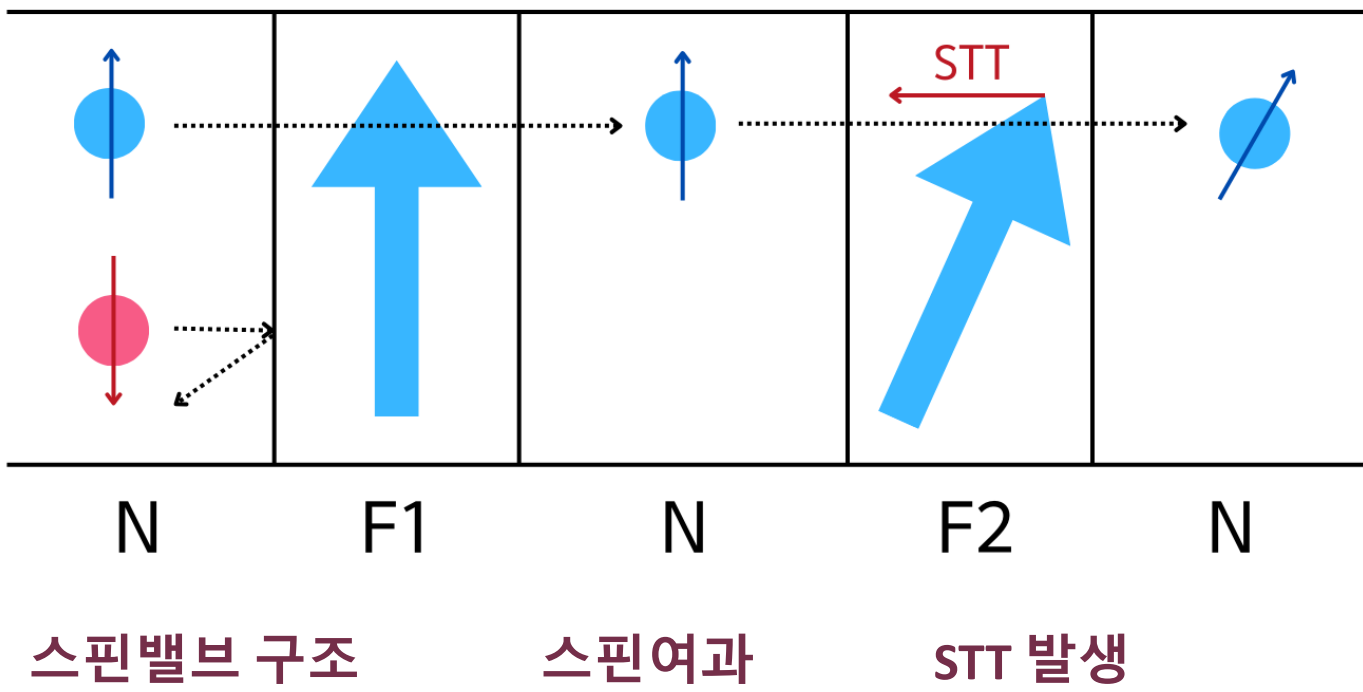
스핀 전달 토크와 스핀-궤도 토크에 관한 이론은 스핀트로닉스의 핵심으로써 스핀동역학에 대한 이해를 심화 시키며 차세대 스핀 소자의 실질적인 응용 가능성을 부여

**스핀 전달 토크(Spin Transfer Torque)** : 전도전자의 스핀이 자성층의 자기 모멘트에 영향을 끼치는 힘

**스핀-궤도 토크(Spin-Orbit Torque)** : 스핀-궤도 결합으로 인해 생겨난 스핀 전달 토크

**스핀 홀 효과(Spin Hall effect)** : 스핀-궤도 결합에 영향을 받아 스핀에 따라 궤적이 휘는 현상

## Spin Transfer Torque



**스핀 전달 토크(STT)** : 다층박막 구조에서 전자가 여과할 때 발생하는 토크

>스핀여과의 결과로 전자는 자성층을 지나고, 자성층의 자화 방향과 같은 방향으로 스핀분극

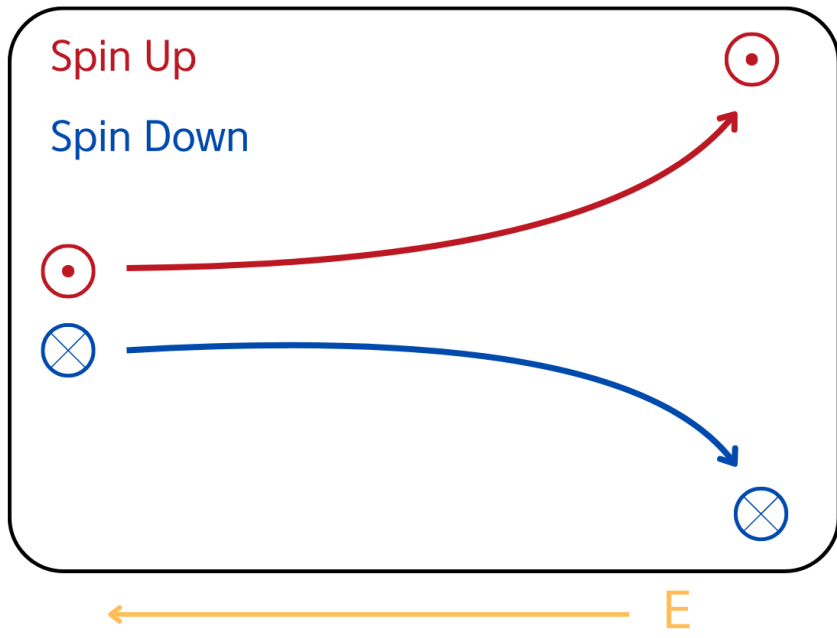
>전체 시스템의 스핀 각운동량 보존에 의해 F2에 STT발생

LLG 방정식 :  $\frac{\partial \hat{m}}{\partial t} = -|\gamma| \hat{m} \times \vec{B} + \alpha \hat{m} \times \frac{\partial \hat{m}}{\partial t} + \vec{N}_{STT}$

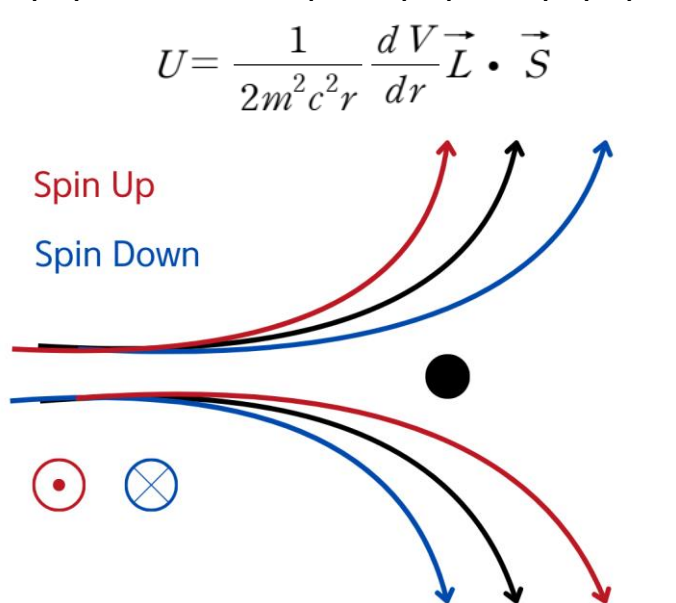
STT :  $\left[ \frac{\partial \hat{m}_2}{\partial t} \right]_{STT} = \vec{N}_{STT} = |\gamma| \frac{\hbar}{2e} \frac{PJ_e}{M_s d} \hat{m}_2 \times (\hat{m}_2 \times \hat{m}_1)$

## Spin Hall effect

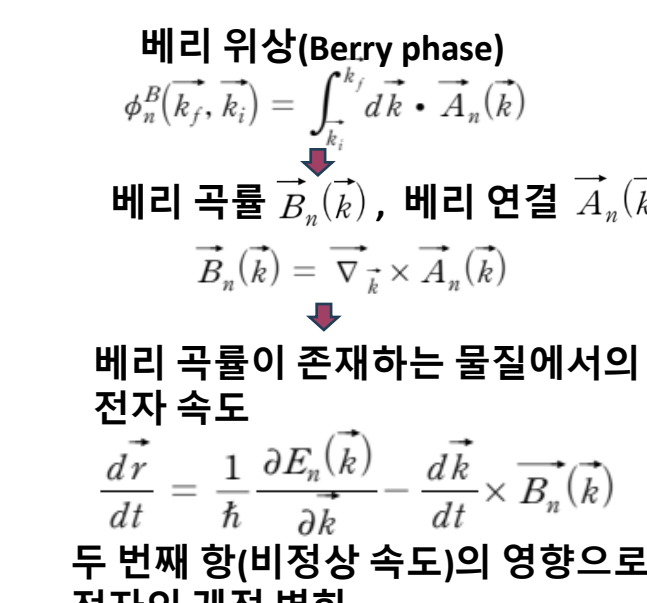
**스핀 홀 효과(Spin Hall effect)** : 스핀-궤도 결합에 의해 전자의 궤적이 휘는 현상



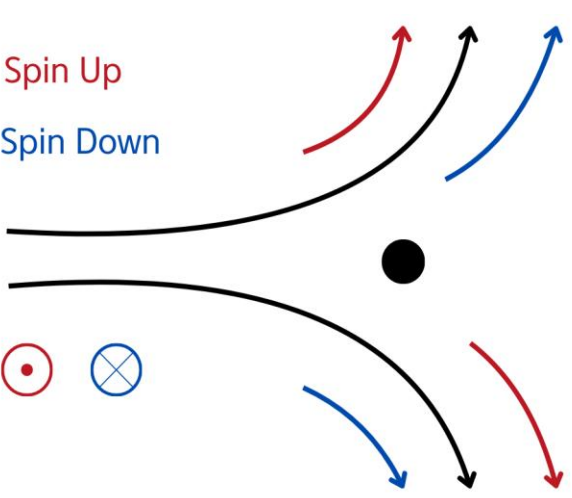
**비틀림 산란 메커니즘(Skew scattering mechanism)** : 전자가 불순물 원자에 의해 산란될 때 전자의 스핀 방향에 따라 산란 방향이 달라지는 메커니즘



**고유 메커니즘(Intrinsic mechanism)** : 불순물에 의존하지 않고 베리 곡률 (Berry curvature)에 영향을 받아 전자의 궤적이 달라지는 메커니즘



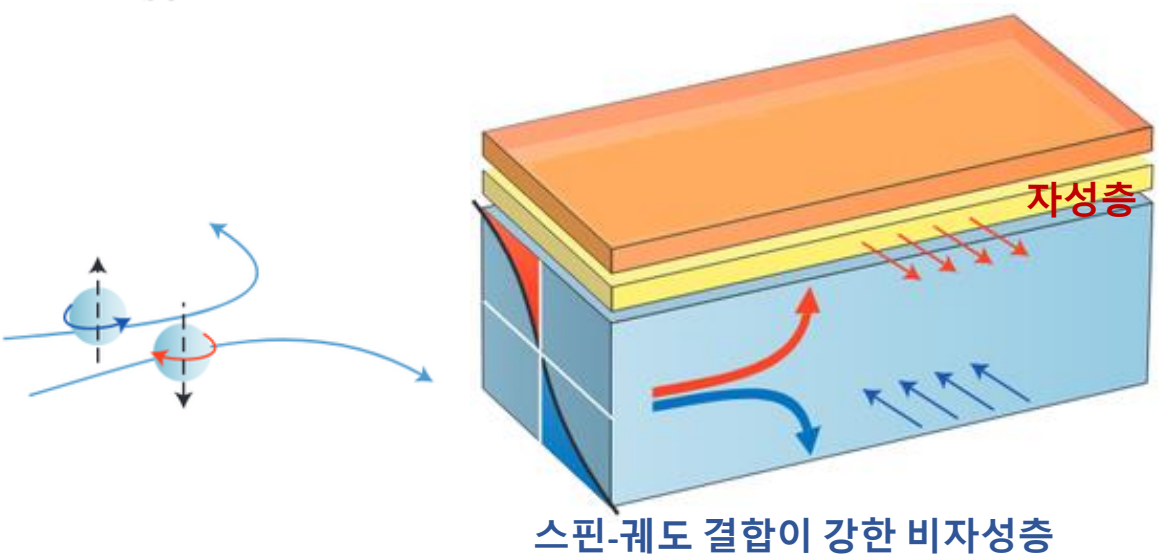
**옆 뒹 메커니즘(Side jump mechanism)** : 전자가 불순물 원자에 의해 산란될 때 베리 위상(Berry phase)이 불순물 원자 주위에서 발생해 스핀 홀 효과 발생



## Spin-Orbit Torque

**SOT** : 스핀-궤도 결합으로 인해 생겨난 스핀 전달 토크

$$\left[ \frac{\partial \hat{m}_2}{\partial t} \right]_{SOT} = \vec{N}_{SOT} = -|\gamma| \frac{\hbar}{2e} \frac{\theta_{SH}}{M_s d} \hat{m}_2 \times [\hat{m}_2 \times (\hat{z} \times \vec{j}_N)]$$



## Conclusion

- ✓STT가 존재하는 경우의 LLG 방정식  $\frac{\partial \hat{m}}{\partial t} \approx -|\gamma| \hat{m} \times \vec{B} - |\gamma| \hat{m} \times (\hat{m} \times (\alpha \vec{B} - a_J \hat{m}_1))$   
 $\alpha B_0 - a_J \Rightarrow$  STT(=  $a_J$ )가 감쇠(damping,  $\alpha$ )와 대립  
전류가 충분히 커서 ( $\alpha B_0 - a_J$ )가 0에 가까워지면 자화는 세차운동
- ✓스핀 홀 효과는 비자성층에서 발생하는 강한 스핀-궤도 결합을 통해 발생  
비틀림 산란, 고유, 옆 뒹 메커니즘을 통해 전자 궤적이 휘는 현상
- ✓SOT는 스핀-궤도 결합을 통해 발생한 스핀 전달 토크  
Pt, Ta, W 등과 같이 큰 원자번호를 가지는 원자에서 강한 스핀-궤도 결합이 일어나며 이런 원자들로 이루어진 비자성체층에서 스핀 홀 효과 발생
- ✓STT와 SOT의 특이한 자화거동은 스핀소자 개발 및 관련 응용 분야에서 발전에 기여  
앞으로의 연구에서는 보다 좋은 성능의 스핀 소자 개발을 위해 정밀한 모델링과 실험적 검증을 요구