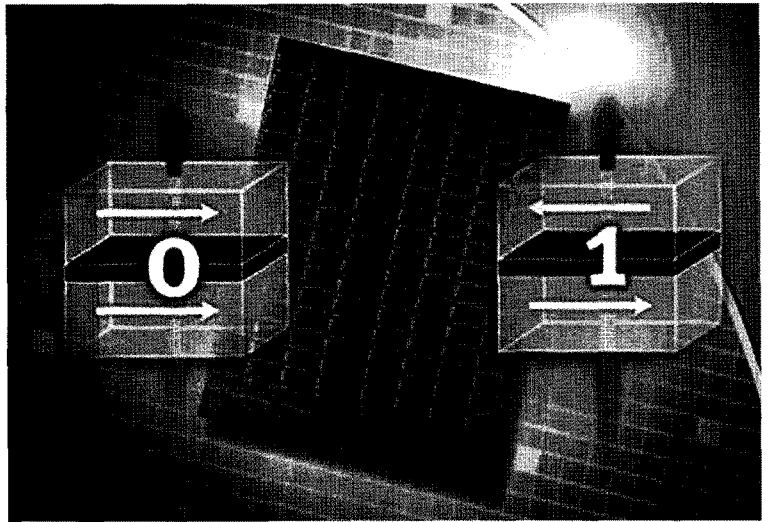


# '절반 금속' 강자성 규화금속 나노선 개발

전자의 전하만을 이용하는 기존의 일렉트로닉스 기술은 현재 한계점에 접근하고 있다. 이와는 달리 전자의 스핀과 전하 특성 모두를 정보전달 수단으로 이용하고자 하는 차세대 기술 분야가 스핀트로닉스이다. 전자의 전하 특성과 함께 전자의 스핀 편극에 따른 수송 특성을 이용하면, 저전력으로 구동할 수 있는 비휘발성의 초고속 차세대 스핀소자의 개발이 가능하다. 특히, 상온 이상의 강자성 특성뿐만 아니라 100%의 스핀 분극도를 가지는 절반금속 1차원 나노물질의 개발은 차세대 나노일렉트로닉스의 혁명적인 발전을 주도할 것으로 기대된다.



전자의 스핀을 이용한 자기 메모리 소자

### 차세대 나노전자소자의 핵심 기술 '스핀트로닉스'

지금까지 눈부신 발전을 보여준 실리콘으로 대표되는 반도체 기반의 일렉트로닉스 기술은 무어의 법칙-마이크로 칩의 저장 용량이 18개월마다 2배로 증가한다-을 따르면서 눈부신 발전을 이루어왔다. 하지만 지난 40년에 걸친 기술적 진보로 인하여 무어의 법칙을 충실히 따라온 현재의 일렉트로닉스 기술은 거의 포화 상태이며 조만간 근본적인 한계에 봉착하게 되어있다. 왜냐하면 실리콘을 이용한 일렉트로닉스 기술은 전하의 움직임에 의해 정보처리를 하는데, 전하가 움직이면 저항에 의해 열이 발생하며, 이 열을 처리할 방법이 어려워져서 어떤 특정 크기 이하로는 작아질 수 없게 된다.

이에 반해 전자의 전하 특성뿐만 아니라 전자의 스핀정보 즉, 업스핀 전자와 다운스핀 전자를 정보전달 수단으로 이용하고자 하는 분야가 스핀트로닉스(스핀과 일렉트로닉스의 합성어)이다. 스핀은 업스핀에서 다운스핀으로 반전시키는 과정에서 열이 전혀 발생하지 않는다. 또한 이러한 스핀을 이용하면 집적밀도가 현재의 수십 기가비트/cm<sup>2</sup>를 넘어 1테라비트/cm<sup>2</sup> 이상 될 수 있는 초고집적도 메모리를 만들어낼 수 있다. 따라서 전자의 전하 특성과 함께 전자의 스핀과 물질 내의 자

성원소와의 상호작용결과 발생하는 전자의 스핀 편극에 따른 수송 특성을 이용하면 무어의 법칙을 넘어서는 극소의 트랜지스터 개발 및 저전력으로 구동할 수 있는 비휘발성의 초고속, 초고집적 차세대 메모리소자의 개발이 가능할 것으로 기대된다.

### 스핀트로닉스 재료의 꽃은 '절반-금속'

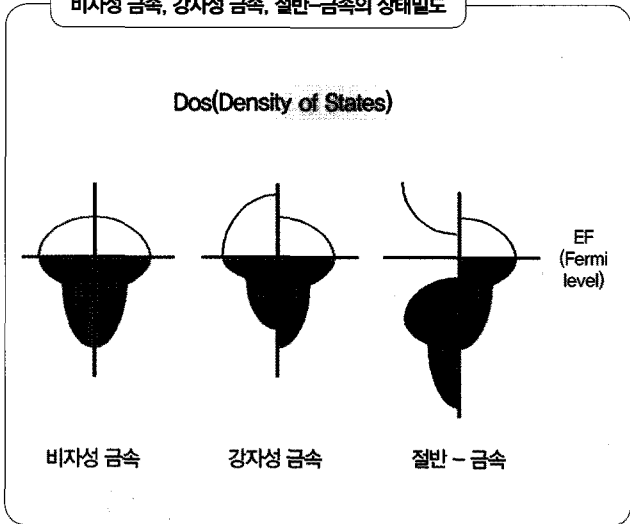
1980년대 후반의 성숙된 진공 기술로 말미암아 얇은 자성박막의 제작 성능이 향상되었고, 이에 따라 다층박막에 대한 연구가 진행되어 강자성(Co)/상자성(Cu)/강자성(Co) 박막에서 각 자성층의 방향이 평행한 경우와 반평행한 경우 저항의 차이가 크게 나타나는 거대자기저항(GMR) 현상을 발견하게 되었다. 이는 1990년대에 하드디스크의 읽기 헤드에 사용되어 하드디스크 저장용량의 폭발적인 향상을 이끌어 내었다. 이에 더하여, 가운데 상자성 박막대신 산화막을 넣어 터널링 현상을 이용하면 자성층의 평행과 반평행한 상태에 따른 저항 변화가 더욱 커진다는 사실이 밝혀졌는데, 이 터널링자기저항(TMR) 현상을 이용하여 평행과 반평행한 상태를 각각 '1'(두 자성물질의 자화방향이 반 평행인 상태로 높은 저항을 가짐)과 '0'(두 자성물질의 자화방향이 평행인 상태



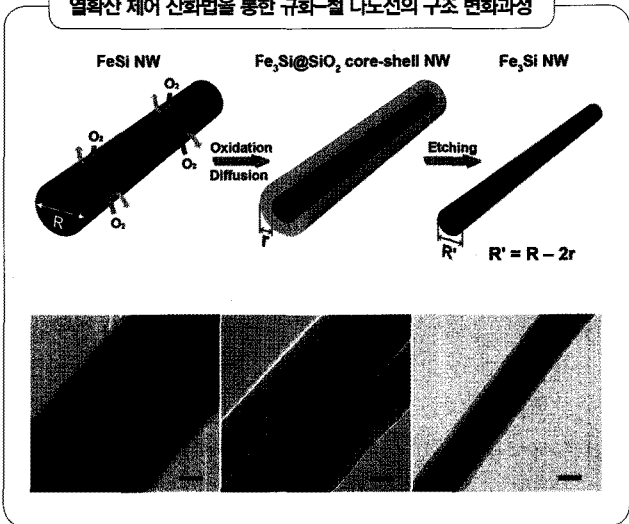
김\_김봉수 KAIST 화학과 교수  
comnsl@gmail.com

글쓴이는 서울대학교 화학과 졸업 후 동대학원에서 석사학위를, UC 버클리에에서 박사학위를 받았으며, 일본 분자과학 연구소에서 박사후 연구원을 지냈다.

비자성 금속, 강자성 금속, 절반-금속의 상태밀도



열확산 제어 산화법을 통한 규화-철 나노선의 구조 변화과정



로 낮은 저항을 가진)이라는 신호로 대체하여 정보를 저장하는 메모리가 자기메모리(MRAM)이다.

이처럼 지금까지는 전통적인 금속 자성재료(Co, Fe, Ni 및 이들의 다양한 조합의 합금)에 새로운 물리적 개념이 가미되어 다양한 정보산업의 발전을 가져왔다. 하지만 소재가 인류에게 얼마나 중요한지는 인류의 역사를 석기, 신석기, 청동기, 철기 시대 등으로 구분하는 것만 봐도 알 수 있으며, 재료 기술의 발전이 인류의 역사를 진보시킨 것이라 해도 과언이 아니다. 스핀트로닉스의 혁명적인 발전을 위해서는 전통 자성재료가 갖는 한계를 뛰어넘기 위한 신재료의 개발이 필수적이다.

스핀트로닉스에 쓰일 가장 흥미로우면서도 이상적인 자성 재료 중 하나는 절반 금속(half-metal)이다. 상자성 금속의 경우 페르미 준위(EF)까지 채워진 업스핀과 다운스핀 전자의 개수가 동일하여 전체적으로 자성을 띠지 않으며, 스핀 자유도를 갖지 않는다.

반면에, 강자성 금속의 경우에는 페르미 준위까지 채워진 업스핀과 다운스핀 전자의 개수가 달라 자성을 띠게 되고, 페르미 준위에 있는 업스핀과 다운스핀의 전하 개수도 다르게 되어 전압을 걸어주면 스핀-분극 전류가 흐르게 된다. 만일 업스핀을 갖는 전자들은 금속성을 갖는 반면에 다운스핀을 갖는 전자들은 절연체 성질을 가져 스핀-분극도가 100%가 되면, 페르미 준위에 오직 한쪽 방향의 스핀을 갖는 전하만이 존재하게 되는데, 이 경우를 절반-금속이라 한다. 절반 금속에서는 전하의 스

핀 분극도가 100%이기 때문에 스핀전류 인젝터, 또는 스핀 자유도를 이용하는 스핀전자 소자용 물질로 매우 중요하게 쓰일 것으로 기대된다.

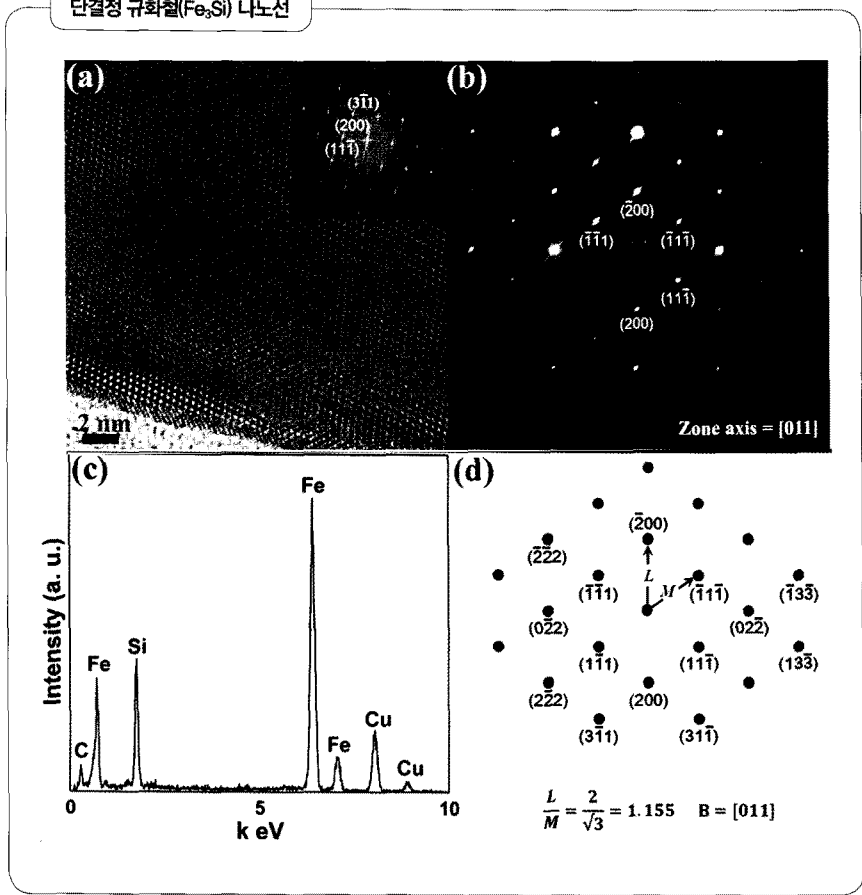
이에 더하여 스핀트로닉스의 효율을 극대화하기 위해서는 스핀의 생성 및 전달에 가장 적합한 단결정 1차원 자성 나노선의 개발이 필요하다. 왜냐하면, 단결정이므로 스핀이 전달될 때 왜곡되지 않으며, 1차원 소재이므로 전달에 특히 효율적이기 때문이다. 그러므로 1차원 단결정 절반 금속 나노선의 개발이 진정한 나노스핀트로닉스 응용을 위한 가장 핵심적이고 필수적인 요소라 할 수 있다.

**미래 스핀트로닉스 핵심 구성요소 '강자성 규화철 나노선'**

이론적으로 예측된 절반 금속의 종류로는 호이슬러 합금(예: Fe<sub>2</sub>MnSi, Co<sub>2</sub>MnSn), 루타일 구조의 CrO<sub>2</sub>, 페로브스카이트 구조의 LCMO(La<sub>1-x</sub>CaxMnO<sub>3</sub>) 등이 있다. 이 중 CrO<sub>2</sub>만이 실험적으로 100%에 가까운 스핀 분극도를 보임으로써 이론적으로 예측된 결과와 유사한 값을 보였을 뿐, 다른 절반-금속의 경우에는 아직까지 이론상에서 예측되는 결과에 훨씬 미치지 못하고 있다. 또한, NiMnSb와 같은 호이슬러 합금이나 페로브스카이트 구조의 망간 산화물(LCMO 등)들은 3성분계 이상으로 성분 조절 및 합성이 매우 복잡할 뿐만 아니라, 실리콘 기반의 일렉트로닉스 기술과의 접목에도 큰 어려움이 있다.

필자의 연구팀에서는 절반-금속성을 가질 것으로 이론적으

단결정 규화철( $\text{Fe}_3\text{Si}$ ) 나노선



산소 분압 조건을 필요로 하므로 낮은 산소 분압 조건 하에서는 실리콘의 산화가 철의 산화에 우선한다.

연구진은 매우 낮은 산소 분압 조건 하에서의 열적 어닐링을 통하여 실리콘은 표면으로 확산되어 나오도록 하고 철 원자는 나노선 중심부로 확산되어 들어간 후 철 원자의 재결정이 이루어지도록 하였다. 이를 통해 단결정 강자성 규화철( $\text{Fe}_3\text{Si}$ ) 나노선을 합성할 수 있었다. 이 변환법은 규화철( $\text{Fe}_3\text{Si}$ ) 나노선뿐만 아니라 흥미로운 물성을 가지고 있지만 합성이 어려운 다양한 종류의 금속이 풍부한 규화금속 나노선의 합성에도 손쉽게 적용할 수 있으므로 매우 가치가 있다.

고성능 일렉트로닉스 소자로 응용

효율적이고 소형화된 초고성능 자기메모리 및 거대자기저항 센서, 양자 컴퓨팅, 고주파 전자통신 소자 등

로 예측된 호이슬러 합금인 규화철( $\text{Fe}_3\text{Si}$ ) 나노선의 개발에 최근 성공하였다. 규화철( $\text{Fe}_3\text{Si}$ )은 840K의 매우 높은 큐리 온도(물질이 자성을 잃는 온도)를 가지며, 높은 스핀분극도(이상적으로 페르미 준위에서 100%의 스핀분극)를 보일 것으로 기대되는 물질이다. 현재까지 국내 및 세계의 여러 우수한 연구팀에서 다양한 자성 규화금속 나노선의 합성에 성공하였음에도 불구하고, 절반-금속성  $\text{Fe}_3\text{Si}$  나노선은 아직 합성하지 못하였다. 하지만, 필자의 연구진은 간단한 열확산 제어 산화법을 이용하여 상자성  $\text{FeSi}$  나노선으로부터 상온 이상의 강자성을 갖는 단결정  $\text{Fe}_3\text{Si}$  나노선을 성공적으로 합성하였다.

이 합성 기술의 핵심은 열확산을 통하여 규화금속 나노선을 금속이 더 풍부한 규화금속 나노선으로 변화시키는 것이다. 여기서 금속과 실리콘은 서로 반대 방향으로 확산되는데, 실리콘은 규화금속 표면의 실리카( $\text{SiO}_2$ ) 층으로 확산된다. 규화철( $\text{Fe}_3\text{Si}$ )에서 철의 산화는 실리콘의 산화에 비하여 6배나 더 많은

다양한 나노소자 개발의 성공 여부는 각종 결함을 포함하고 있는 물질 내에서 전자 스핀의 거동을 얼마나 잘 이해하고 조작하느냐에 달려있다. 보통의 금속 자성체를 이용하여 스핀-분극된 전자를 반도체에 공급할 경우에는 계면에서의 산란에 의해 분극을 쉽게 잃어버리는 특성이 있어 이를 대체할 소재의 필요가 절실하다.

따라서 단결정성을 가지며, 상온 이상에서 강자성을 띠고, 100% 스핀-분극된 전하의 원활한 주입이 가능할 뿐만 아니라 기존의 실리콘 기반 기술과의 뛰어난 적합성을 지닌 절반 금속 규화철( $\text{Fe}_3\text{Si}$ ) 나노선의 개발은 신개념의 스핀소자 제작을 위한 핵심 구성요소로서 기존 반도체 소자의 성능을 획기적으로 개선시킬 수 있을 것으로 기대된다. 더욱이 차세대 스핀소자의 원천 기술 확보라는 관점에서 관련 산업에서 독보적인 경쟁력을 확보할 수 있을 뿐만 아니라, 막대한 기술료 수입과 함께 국가 경쟁력 향상에도 큰 효과를 예상할 수 있다. (ST)