

# 「ナノ周期構造によるスピントロニクス材料の特性制御」

発表者：宮川 勇人

## 1. 目的

次世代の情報化社会を牽引する代替技術として、従来の電荷制御型半導体デバイスに磁気スピン機能と光特性（発光・吸収）とを併せ持たせたフォト・スピントロニクス情報デバイスが注目されている。磁性体と半導体とを組み合わせた人工ナノ周期構造によるデバイス材料の特性制御を目的とし、蒸着法をベースとしたナノ構造の作製技術向上を図ると同時に電磁特性・光磁気特性を評価し、機能発現の理論構築と予測設計を行った。

## 2. 研究概要

現代の高度に発達した情報化社会を支えているのは、電荷制御型の半導体エレクトロニクス技術である。デバイスの高密度化や演算処理の高速化は著しくその限界が予想され、代替する新しい技術が待望されている。電子の持っている電荷に加え、スピン自由度を制御することで電気特性とスピン特性さらには発光吸収特性を融合機能させた「フォト・スピントロニクス技術」によれば、メモリへの不揮発性の付与による省エネルギー化や光演算・量子演算による高速化、機能化を図ることができる。本研究では、半導体と磁性体とを人工周期ナノ構造（図1参照）によって融合させ、複雑な磁気挙動を評価することで磁気デバイス材料としての特性向上を行い、光特性・伝導特性との相互制御を試みた。

### (1) 人工ナノ周期構造の作製・評価

異種相を交互蒸着させた面直方向のナノ周期構造と、短波長レーザーによる干渉性リソグラフィーを用いた面内方向のナノ周期構造を作製した。1ナノm/秒以下の蒸着レートにより平坦かつ急峻な界面をもつ数ナノメートル周期構造の作製に成功した（図2参照）。半導体上の金属磁性体多層膜 Gd/Fe において Fe 第3層までの結晶整合性が確認され更に短周期構造での多層全体のエピタキシャル成長の可能性が示唆された。現在は希薄磁性半導体/非磁性半導体の超格子の作製を試みている。一方、干渉性リソグラフィーによってサブミクロン周期の磁性ナノ・アレイの作製に成功しており、更なる短周期化を進めている（図3）。ライン内部において面直ナノ周期構造を有したハイブリッド構造の作製も可能である。

### (2) ナノ周期構造におけるスピン・エネルギーの評価

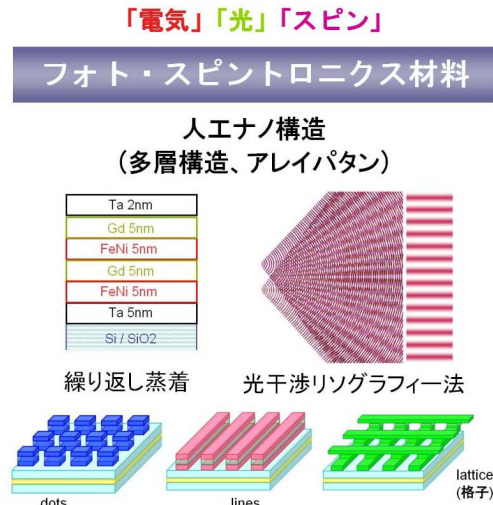


図1 フォト・スピントロニクス材料としての繰り返し蒸着と光干渉リソグラフィー技術によるナノ周期構造の例。

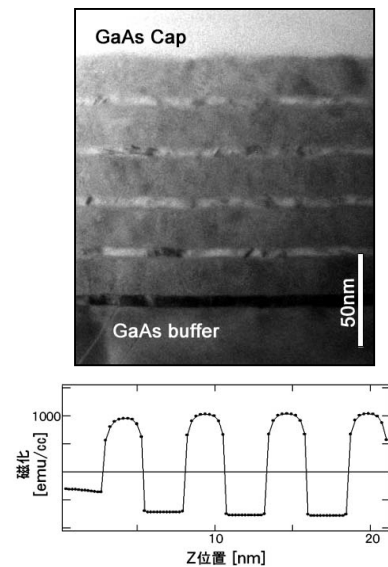


図2 (上)作製した異種磁性層のナノ周期積層構造。(下) シミュレーションによるスピン状態の計算

原子同士の磁氣的結合性（交換エネルギー）が強い遷移金属（Fe, Ni など）と、原子あたりの磁気モーメントが大きな希土類元素 Gd（ガドリニウム）とからなるナノ周期構造を作製し磁気特性を評価した。ナノ周期構造内部ではスピン間の交換エネルギーが競合する結果、スピン

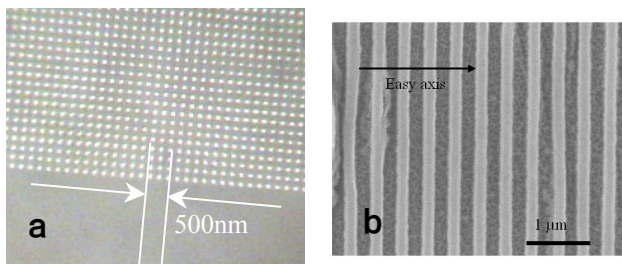


図3 半導体上に設計製作された面内パタニングによる周期アレイ・ストラクチャー。(a) ドット (b) ライン

配向の特異な温度依存性を示した。ナノ形状を考慮したシミュレーションから理論的にスピン配向を予測し（図2下）、交換パラメータを定量評価することで元素戦略的なデバイス設計を可能とした。また面内方向における種々のスケールのライン・パタニングを行い、双極子作用（漏れ磁場）がナノ構造に及ぼす影響力を評価した。

### (3) スピンホール・デバイスの試作と検証

金の導電ラインを磁性体ラインで挟みこんだライン・アレイ構造を作製し、通電により上下方向へのスピン流を発生させ（スピン・ホール効果）隣接する磁性ラインの偏極を検証した（図4）。形状異方性効果によりスピンの拡散してしまうことが判明したものの、今後、直交する2回のライン・パタニングで磁気異方性を付与したナノラティス構造を作製すれば、効率よいスピン蓄積が可能と考えられる。

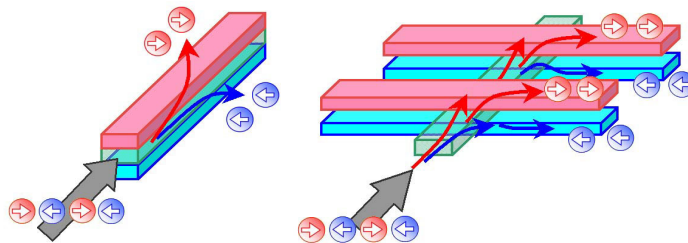


図4 電流を流すだけでスピン流を発生させるスピン・ホール効果の例 (a) 電流が流れている間のみスピン流が発生 (b) 異方性の付与により電流で磁性を制御

## 3. 成果の活用

本研究対象としている人工ナノ周期構造は、半導体の持っている光・電気特性と磁性体のもつスピンを融合させ、不揮発性を持つ高速かつ省電力メモリや、自己書き換え可能な進化型回路、光演算やスピン演算による高速多重計算（光コンピュータ、量子コンピュータ）などの実現を可能とするものである。低レイト蒸着と干渉性リソグラフィーにより周期の大きさと構成比率を任意に変化させることで、付随するマクロ特性の精確な制御が可能である。また大面積のナノドット・アレイやナノラティスも比較的容易に形成することができる。磁気特性評価から得られたエネルギーパラメータは、ナノ形状を考慮した理論シミュレーションにおいてより正しい物性予測を可能とする。

## 4. 備考

- ・文科省、科学研究費補助金：若手（B）「希土類添加型磁性半導体超格子の作製と放射光による構造・物性評価」（H18年度～H20年度）に採択
- ・文科省、国際化加速プログラム（海外先進研究実践支援）「情報化対応の統計分析法と基盤技術の開発（フォトスピントロニクス情報デバイスの開発）」（H20年度）に採択（米マサチューセッツ工科大学の Ross グループとの共同研究体制のもとに実施されたものであり、幾つかの研究テーマは継続進行中である。）