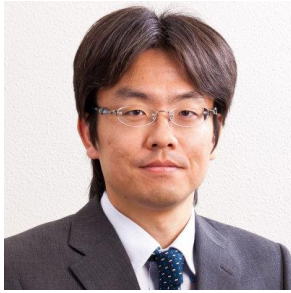


光スピントロニクス基盤技術の研究

Core technologies for opto-spintronics



池田 和浩 (Kazuhiro IKEDA, Ph. D.)

産業技術総合研究所 電子光技術研究部門
研究グループ長

(Group Leader, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Electronics and Photonics Research Institute)

応用物理学会 電子情報通信学会 Optical Society of America IEEE Photonics Society

著書: "Dielectric metamaterials," in *Tutorials in Metamaterials*, M.A. Noginov and V.A. Podolskiy (Eds.), Abingdon, Oxford, UK, CRC Press (Taylor and Francis Group), 2011 (共著)

研究専門分野: 集積フォトニクス 光スピントロニクス シリコンフォトニクス

あらまし 将来のシリコン集積回路の消費電力における物理的限界を乗り越える技術として、電子のスピン状態を新たな自由度として用いるスピントロニクスが注目されている。不揮発性を有するスピントロニクスは、製品開発が進んでいる半導体メモリに限らず、年率 40%で増加を続けるインターネットトラフィックを担う光ネットワークおよび光デバイスにおいても革新的な低エネルギー化に資する重要な技術である。本研究では、光とスピントロニクスを融合した光スピントロニクスによる不揮発光バッファメモリのような新規デバイスを実現するための基盤技術に着目した。具体的には、光と電子スピンの間のインターフェース素子として機能する面発光半導体レーザ (VCSEL) を実現するための基盤技術となる、VCSEL 用化合物半導体上での垂直磁化電極形成技術、VCSEL をはじめとする半導体光デバイスの局所スピン物性評価技術の研究に取り組んだので、その成果を紹介する。

1. 序論

将来のシリコン集積回路の消費電力における物理的限界を乗り越える技術として、電子のスピン状態を新たな自由度として用いるスピントロニクスが注目されている。特に半導体メモリ分野においては、2006年にMTJ (Magnetic Tunnel Junction) を用いた不揮発、無限書換可能なMRAM (Magnetoresistive Random Access Memory) が製品化されて以来、多くの研究機関・企業の注目を集め、現在ではスピントルク (STT) 磁化反転により書込を行うMRAM (STT-RAM) が製品化され、その大容量化・低コスト化の検討が活発に進められている[1]。不揮発性を有する新機能スピントロニクスデバイスの開発は、半導体メモリに限らず、高度情報通信社会の革新的な省エネルギー化に向けて重要なテーマである。たとえば、年率40%におよぶインターネットトラフィックの増加に伴って、ネットワークの消費電力は、このまま推移すれば、2025年頃には日本国内の総発電量に匹敵するという試算があり[2]、これを克服するためにネットワークの全光化などの技術革新が求められている。そこで本研究では、光技術とスピントロニクスを融合し、革新的な低消費電力化が期待できる光スピントロニクス・デバイスの創成を最終目標としている。例えば、ネットワークの全光化に必要な光パケットルータの基幹装置となる光バッファメモリとして、スピントロニクスの不揮発性を導入した低消費電力かつ集積化が容易な全く新しい不揮発光メモリを提案している。

著者らは、電子スピン緩和時間の非常に長いGaAs(110)基板上量子井戸を用いた光スピントロニクス・デバイスの研究にいち早く取り組み、現在までに光学的なスピン注入によるGaAs(110)基板上面発光半導体レーザ (スピン制御 VCSEL) の室温円偏光発振に成功している[3]。スピン制御 VCSEL は活性層における電子のスピン偏極を反映して左または右円偏光でレーザ発振する光スピントロニクス・デバイスであり、光信号と電子スピン偏極信号との間のインターフェースとして機能する。著者らは、このVCSEL上に強磁性薄膜を形成し、円偏光信号の光電流による同薄膜のスピントルク磁化反転 (書込み)、および同薄膜からの電氣的スピン注入によるVCSELの円偏光発振 (読出

光スピントロニクス基盤技術の研究

Core technologies for opto-spintronics

し)を実現できれば、実用的にブレイクスルーとなりうる不揮発光メモリを創成できるという着想に至った[4]。これまでに達成した光学的スピン注入によるVCSELの円偏光発振[3]は、右円偏光光パルスによるスピン偏極電子の励起と、それによる右円偏光レーザ発振を実現したものであり、上記の「書込み」及び「読出し」を、強磁性薄膜での保持を介さずに連続的に行ったことに相当する。すなわち、半導体部分に関しては、既に必要な機能をほぼ実証しており、本研究における次の課題は、強磁性薄膜の形成、および同薄膜への情報の書込み・読出しである。本稿では、その基盤技術として、スピン制御 VCSEL の基板となる GaAs(110)上への垂直磁化電極形成、およびスピン制御 VCSEL をはじめとする光スピントロニクス・デバイスの局所スピン物性評価について報告する。

2. GaAs(110)基板上垂直磁化 FeTb 薄膜の成長

スピン制御 VCSEL は、円偏光光子とスピン偏極電子との間のインターフェース素子となりうるが、角運動量保存則に基づく光子と電子の相互作用を効果的に応用するためには、光子の伝搬方向（ヘリシティ軸）と電子のスピン方位が一致する必要がある。したがって、光の入出射が基板に垂直である VCSEL においては、電子のスピン方位、すなわち強磁性薄膜の磁化方向も基板面に垂直でなければならない。一般に、強磁性薄膜は磁化容易軸が面内方向であり、強磁場の印加により磁化を強制的に垂直方向に向かせる必要があるが、実用的には自発的に垂直磁化する強磁性電極が必要である。そこで本研究では、垂直磁化特性が報告されている FeTb 薄膜に着目した。FeTb アモルファス合金は光磁気ディスク用垂直磁化膜として実用化されているが[5]、使用されてきた基板はガラス等であり、スピン注入を目的として半導体上に作製した報告はない。本研究では、GaAs(110)上に FeTb 垂直磁化膜を作製することを目的とし、FeTb アモルファス合金を作製し、磁化特性の評価を行った。

分子線エピタキシー (MBE) 装置を用いて、GaAs(110)、(100)基板上に FeTb アモルファス合金(100 nm)を Tb 組成(12~30%)、成長レート(0.1~0.65 nm/s)を変えて成膜し、すべての試料において表面保

護層として Au(5 nm)を成長した。図 1, 2 に GaAs(110)基板上に成長した試料の最大磁化 M_s (または飽和磁化) と残留磁化 M_r の Tb 組成依存性を示す。

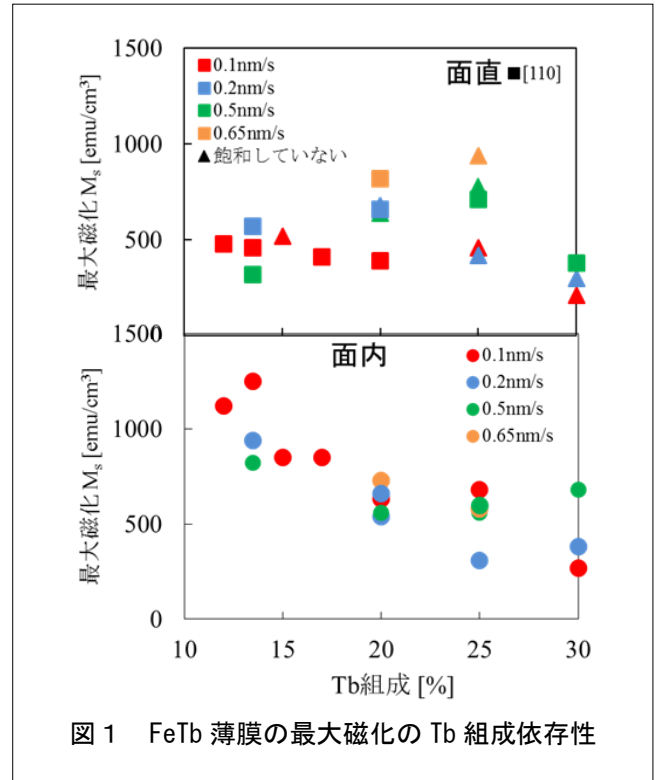


図 1 FeTb 薄膜の最大磁化の Tb 組成依存性

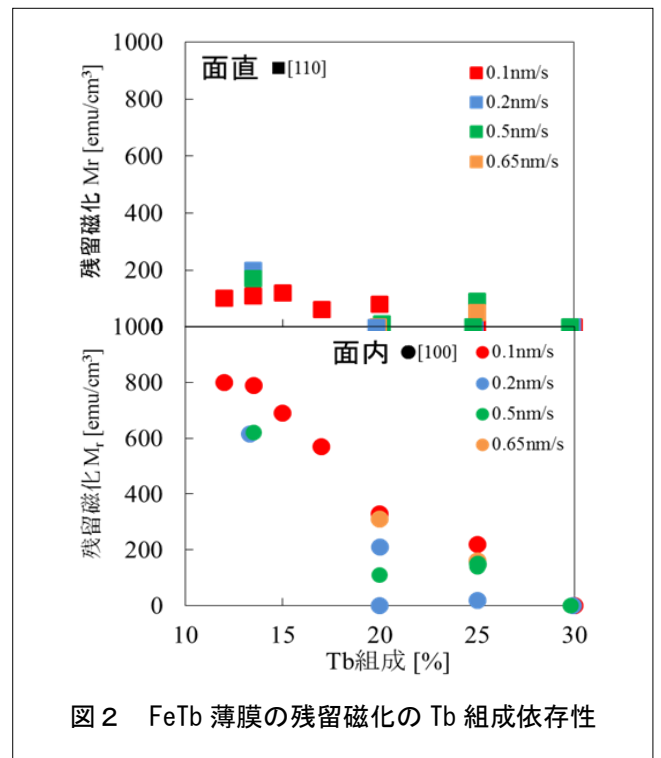


図 2 FeTb 薄膜の残留磁化の Tb 組成依存性

光スピントロニクス基盤技術の研究

Core technologies for opto-spintronics

Tb 組成 17%以下では、 M_s , M_r ともに面内方向に顕著であり、 M_r において[100]方向（面内）が[110]方向（面直）よりも非常に大きいことから、[100]方向が磁化容易軸であることが分かる。このことは、Tb 組成 17 %以下では、Fe が下地の GaAs(110)表面を反映して配向していることを示しており、X 線回折測定結果にもその特徴が見られた。Tb 組成 20%, 25%では、面内の M_s , M_r は小さくなり、面直と同程度になった。これは、この組成近傍に互いに反平行である Fe と Tb の磁化が相殺する補償組成が存在するためである。補償組成付近では、 M_s が小さくなることで反磁界に起因する面内磁気異方性が小さくなるため、垂直磁化になりやすい。図 1 より、成長レートを上げた場合に Tb 組成 20%と 25%で面直の M_s が増大しており、磁化が垂直方向に向きやすくなっていることが分かる。

図 3 に Tb 組成 25%、成長レート 0.65 nm/s の試料の振動試料型磁力計測定結果を示す。 M_s は面直方向が面内方向より大きく、面直にヒステリシスループが見られる。成長レートを上げたことで、Fe の分布が不均一化し、Tb の 1 イオン異方性が増大したと考えられる[5]。使用した MBE 装置の材料セルでは 0.65 nm/s が最速であったため、電子ビーム蒸着法などにより、さらにレートを速めることで面直方向に磁化容易軸を有する膜が得られると考えられる。なお、GaAs(110)と(100)基板では、磁化特性の傾向に大きな違いは見られなかった。

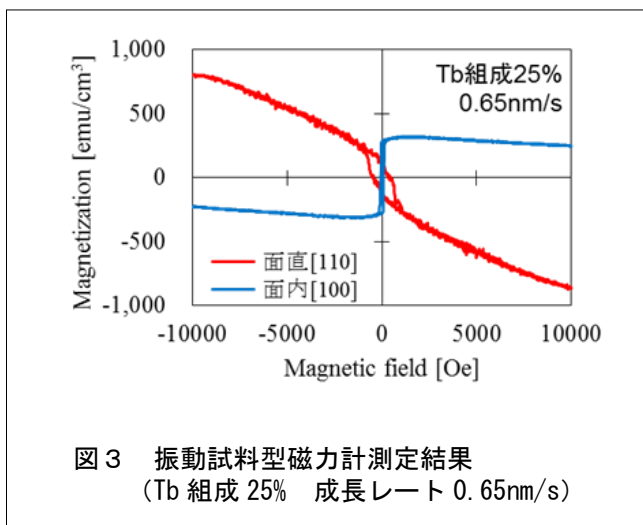


図 3 振動試料型磁力計測定結果 (Tb 組成 25% 成長レート 0.65nm/s)

成長した FeTb アモルファス合金において、そのフェリ磁性の特徴である補償組成および補償温度を確認

し、成長方法を確立した。その上で主に成長レートを上昇させることで垂直方向の残留磁化 109 emu/cm³ を持つ FeTb 薄膜の作製に成功した。さらに成長設備を改良することによって、スピン制御 VCSEL に適用できる垂直磁化 FeTb 薄膜を作製できると考えられる。

3. 光スピントロニクス・デバイスの局所スピン物性評価

本研究のスピン制御 VCSEL では、レーザ発振領域における局所的な電子スピン物性を評価することが今後の研究で重要となる。例えば、電子スピン緩和時間 τ_s や電子スピン拡散などは発振偏光に直接影響するため、その値を把握し、構造設計に反映する必要がある。そこで、時間分解顕微フोटルミネセンス (PL) 法を用いて、GaAs(110)量子井戸における微小領域のスピン拡散定数の同定方法を開発した。

被測定サンプルはノンドープ(110) GaAs/AlGaAs 50 周期量子井戸であり、ns オーダの長い τ_s により室温での測定・解析を容易にしている。PL 波長（重い正孔帯への遷移）は室温で 849 nm である。励起光源にはモード同期チタンサファイアレーザ（パルス時間幅 ~ 70 fs、繰り返し周波数 80 MHz、波長 780 nm）を用い、円偏光パルスでサンプルを励起後、励起された電子のスピン偏極を反映した PL の左右円偏光成分の時間変化をストリークカメラで測定し、緩和時間 τ_s 、キャリア寿命 τ_c 、および初期スピン偏極度 P_0 を評価した。顕微 PL 法では 10 倍の対物レンズを用い、約 4 μm まで励起光を集光し、同じレンズで PL を受光した（図 4）。スポットサイズ依存性を見るために、単レンズによる PL 測定も行い、この時の励起スポットサイズは 19 μm および 25 μm であった。

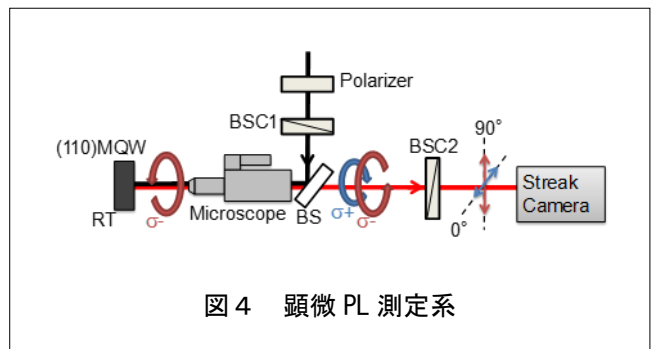


図 4 顕微 PL 測定系

光スピントロニクス基盤技術の研究

Core technologies for opto-spintronics

時間平均の励起強度 0.8 kW/cm^2 における τ_s , τ_c , P_0 のスポットサイズ依存性を図 5 に示す。 P_0 はスポットサイズにほとんど依存せず、高い空間分解能で測定を行っても測定結果には影響がないと考えられる。 τ_c はスポットサイズが小さくなると短くなる傾向を示しており、これは発光再結合に加えて、励起キャリアが周囲に拡散し、受光領域のキャリア数が減衰するためである。一方、 τ_s はスポットサイズが $4 \mu\text{m}$ の場合に長い値を示した。スピン状態を考慮したドリフト拡散方程式[6]を用いて解析した結果 (図 5)、励起強度の空間分布に起因する電子スピンの空間分布によってスピン拡散が生じ、受光領域においてスピン偏極度が維持されるように作用することで測定される τ_s が長くなるのが分かった。この時、フィッティングによって得られたスピン拡散定数はおよそ $100 \text{ cm}^2/\text{s}$ であり、これまでに報告されている値[7]に近いものであった。

本研究の測定手法は、スピン制御 VCSEL の微小な活性領域において電子スピン緩和時間や電子スピン拡散定数を同定できるため、スピン制御 VCSEL の開発において重要なツールになると期待される。

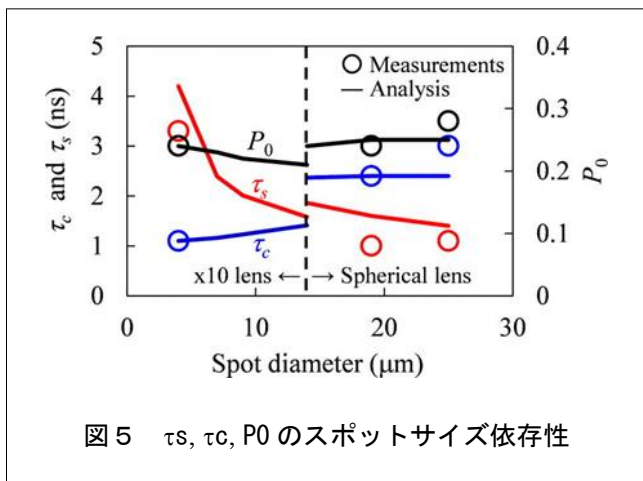


図 5 τ_s , τ_c , P_0 のスポットサイズ依存性

4. まとめと展望

本稿では、スピン制御 VCSEL の実現において欠かせない 2 つの基盤技術の開発について報告した。GaAs(110)基板上に FeTb 垂直磁化膜を作製する条件を検討し、主に成長レートを上昇させることで、垂直方向の残留磁化 109 emu/cm^3 を持つ FeTb 薄膜の作製に成功した。また、時間分解顕微 PL 法を用いて、スピン

制御 VCSEL の活性領域における電子スピン拡散定数の同定方法を開発した[8]。これらの成果をもとに、今後スピン制御 VCSEL の研究開発を進める。また最近、通信波長帯である $1.55 \mu\text{m}$ 帯におけるスピン制御 VCSEL の研究も進めており[9]、様々な方向から光スピントロニクスの創成に寄与していきたいと考えている。

参考文献

- [1] EE Times Japan, 「“完成形”にこだわらず：次世代不揮発メモリ、まずは出荷を — Everspin」, 2016 年 9 月.
- [2] 産業技術総合研究所 光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点 <http://www.aist-victories.org/>
- [3] S. Iba, S. Koh, K. Ikeda, and H. Kawaguchi, Appl. Phys. Lett. 98, 081113 (2011).
- [4] 池田 他、特許第 5,688,739 号
- [5] 寺尾元康 他、光メモリの基礎, コロナ社 (1990).
- [6] H. Zhao, M. Mower, and G. Vignale, Phys. Rev. B 79, 115321 (2009).
- [7] A. R. Cameron, P. Riblet, and A. Miller, Phys. Rev. Lett. 76, 4793 (1996).
- [8] K. Ikeda, and H. Kawaguchi, J. Appl. Phys. 117, 053903 (2015).
- [9] 横田, 池田 他, 「InAlGaAs 量子井戸面発光レーザにおける発振円偏光度の複屈折依存性」, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 14p-C41-6, 新潟, 2016 年 9 月 14 日.

この研究は、平成 24 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 25 ~ 27 年度に実施されたものです。