

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04709

研究課題名(和文) 光通信波長帯スピン制御光デバイスの研究

研究課題名(英文) Optical communication wavelength spin-controlled optical devices

研究代表者

池田 和浩 (IKEDA, Kazuhiro)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究グループ長

研究者番号：70541738

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：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、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り、本研究では光学的なスピン注入によって、光通信波長帯面発光レーザーの円偏光発振を世界で初めて実現した。また、本研究を進めている中で、スピン制御VCSELを用いた新しい高速直接変調法の着想を得たため、この原理実証実験により非常に簡便な構成で23GHzの3dB帯域を達成した。

研究成果の概要(英文)：Novel functional nonvolatile spintronics devices are important for ultra-low power consumption information and communication society. We have demonstrated, for the first time, circularly polarized lasing of optical communication wavelength vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) by optical spin injection. Furthermore, we have conceived a novel high-speed direct modulation scheme in spin-controlled VCSELs and demonstrated the concept by achieving a 3-dB bandwidth of 23GHz.

研究分野：光エレクトロニクス、光集積回路、シリコンフォトニクス、

キーワード：VCSEL 電子スピン

### 1. 研究開始当初の背景

将来のシリコン集積回路技術の処理速度、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(Magneto-resistive 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、現在ではスピン注入書込方式によるMRAM(スピンRAM)の大容量化の検討が活発に進められている。スピンRAMは現在のDRAMやフラッシュメモリに代わるデバイスとして産業的なインパクトも大きい。これに限らず、不揮発性を有する新機能スピンデバイスの開発は、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。例えば、スピントロニクスを半導体光デバイスに適用することで、年率40%におよぶインターネットトラフィックの増加を担う光通信ネットワークの消費電力を格段に低減できる可能性がある。本研究は、不揮発性を有するスピントロニクスを導入した、低消費電力なスピン制御光デバイスを、応用上きわめて重要な光通信波長帯かつ室温で実現することを最終的な目的としている。

### 2. 研究の目的

不揮発性を有する新機能スピンデバイスの開発は、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り、本研究代表者および分担者は、電子スピンの自由度を光デバイスに活用する研究を進めてきた。最近、応用上特に重要な光通信波長帯(1.55 $\mu\text{m}$ 帯)、かつ室温において長い電子スピン緩和時間を有する材料系(InGaAs/InAlAs量子井戸)を世界で初めて見出した。この材料系は、近年短距離網への適用が進められている光通信波長帯面発光レーザにも用いられている。本研究では、当該活性層材料を有する面発光レーザのスピン物性を調べた上で、光学的なスピン注入によって、光通信波長帯面発光レーザの円偏光発振を世界で初めて実現することを目的とする。本課題はスピントロニクスとフォトリソグラフィの融合において重要である。

### 3. 研究の方法

InGaAlAs系量子井戸を有する面発光半導体レーザ(VCSEL)の光学的スピン注入による室温円偏光発振を試みる。円偏光短パルスレーザを用いて光学的にスピン注入し、円偏光発振を試みる。さらに、無偏極定常電流によるキャリア注入と、光励起によるスピン偏極キャリア注入を、割合を変えて同時に行うことで、どの程度のスピン偏極度で円偏光発振が得られるか、などの新しい知見を得る。

### 4. 研究成果

InGaAs/InAlAs系量子井戸を活性層とするVCSELの最初の評価サンプルとして、RayCan製のシングルモード製品を選定し、光励起によるレーザ発振を試みた。モード同期チタンサファイアレーザを光源とした光パラメトリック発振器(OPO)から出力されるフェムト秒パルスを励起光とし、波長を1420nm付近に設定して40倍対物レンズでVCSELのメサ構造に向けて照射した。VCSELの発光はロングウェーブパスフィルタで励起光を除去したのちInGaAsアレイ分光器で受光した。ここで、活性層にスピン偏極電子を励起するために、励起光を円偏光に調整したが円偏光発振は得られず、励起光の偏光に依らず特定の直線偏光で発振した。原因として、VCSELチップの残留応力(複屈折)によって偏光が固定されていると考え、今回のサンプルの直交直線偏光モード間のモード分離(30GHz程度)を小さくすることにより偏光の固定を解くことを試みた。モード同期チタンサファイアレーザからの波長900nmの高強度パルス光をVCSELに照射し、表面をスポット加工することで応力を変化させたところ、モード分離を6GHzに低減することに成功した(図1)。このVCSELを用いて同様の円偏光励起を行ったところ、円偏光度10%程度と小さいが、発振偏光の制御を実現した(図2)。スピンフリップモデルによる解析を行い、得られた実験データについて考察を進めた結果、残留複屈折と発振円偏光度の相関関係が明らかになった。さらに、①長い電子スピン緩和時間により複屈折の影響が低減されること、②初期スピン偏極度を向上させることで発振閾値よりも大きな励起強度においても高い円偏光度を維持できること、が分かった。これらの成果は、国内の学会および研究会にて口頭発表を行い、また国際論文誌に投稿し、受理・出版された。

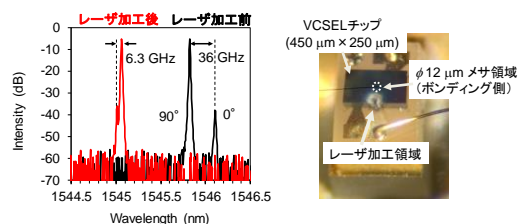


図1. レーザ加工による偏波モード分離の低減

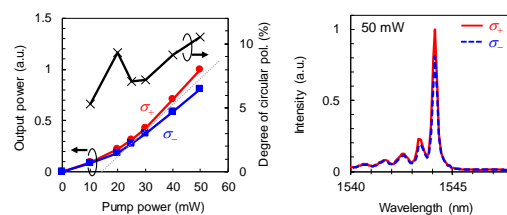


図2. レーザ発振特性(左: 励起パワー依存性、右: 偏光分解発振スペクトル)

本研究を進めている中で、スピン制御 VCSEL を用いた新しい高速直接変調法の着想を得たため、この原理実証実験に取り組んだ。具体的には、VCSEL に上向きスピンと下向きスピンの電子を差動的に信号の 1/0 に対応させて注入（スピン偏極変調）することで、左右円偏光の変調を行う。必要に応じて偏光素子を用いて強度変調や位相変調に変換することができる。従来の電流の ON/OFF による直接変調では、緩和振動の影響で変調速度に制限があったが、新しいスピン偏極変調では注入するキャリアの総量が変わらないため、緩和振動の影響を受けない。加えて、左右円偏光での変調においては、キャリア周波数が定常時の発振直線偏光、変調サイドバンドがそれと直交する直線偏光となるため、変調サイドバンドが VCSEL の複屈折により分離した直交偏光モードと結合でき、この周波数分離を大きくすることによって高い周波数の変調感度を増大させることができる（図 3）。原理実証実験では、位相変調器を用いて励起光を左右円偏光間で差動変調し、これを InGaAs/InAlAs 系量子井戸 VCSEL に注入することでスピン偏極変調した。これ

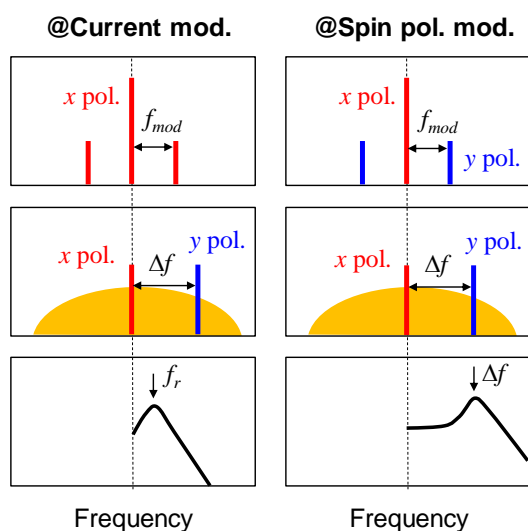


図 3. スピン偏極変調と偏波モード分離による VCSEL の高速変調動作の原理（上：変調信号スペクトル、中：レーザーモード・利得スペクトル、下：周波数応答）

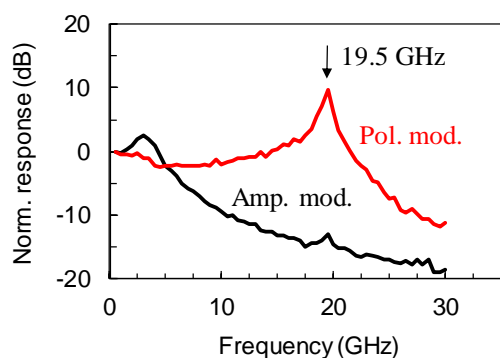


図 4. レーザ発振特性（左：励起パワー依存性、右：偏光分解発振スペクトル）

によって VCSEL の発振偏光は左右円偏光間で差動変調されるが、これをバランス検出し変調感度特性を評価した。サンプルはレーザ加工による応力付与によって直交偏光モード間の周波数分離を制御し、複数の周波数分離を持つサンプルを用意した。測定結果（図 4）では、周波数分離に相当する 19.5GHz において明確な変調感度ピークが見られ、23GHz の 3dB 帯域を達成した。この成果は、国内学会にて口頭発表済であり、今後国際会議および国際論文誌にて発表予定である。

また、当初予定していた VCSEL の InGaAs/InAlAs 量子井戸の基礎特性評価に向けて、FIB によって VCSEL 表面の金電極、上部 DBR の除去加工を実施した。今後電子スピン緩和時間などの評価を予定している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① N. Yokota, R. Takeuchi, H. Yasaka, K. Ikeda, “Lasing Polarization Characteristics in 1.55-um Spin-Injected VCSELs,” IEEE Photon. Technol. Lett. 29, 711-714 (2017). (査読あり)  
DOI: 10.1109/LPT.2017.2681129

〔学会発表〕（計 4 件）

- ① Nobuhide Yokota, Kunpei Nisaka, Hiroshi Yasaka, and Kazuhiro Ikeda, “High-Speed Modulation of 1.55-um VCSELs with Spin Polarization Modulation,” Conference on Lasers and Electro-Optics 2018, STu3Q.2.
- ② 横田 信英、二坂 薫平、八坂 洋、池田 和浩、「電子スピン偏極変調による InAlGaAs 面発光半導体レーザの高速動作」第 65 回応用物理学会 春季学術講演会、2018.
- ③ 横田 信英、竹内 隆太郎、八坂 洋、池田 和浩、「スピン制御面発光レーザにおける発振円偏光度の複屈折依存性」レーザ・量子エレクトロニクス研究会、2017.
- ④ 横田 信英、竹内 隆太郎、八坂 洋、池田 和浩、「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、2016.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.yasaka.riec.tohoku.ac.jp/index.html>

<http://kazikeda.server-shared.com/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

池田 和浩 (IKEDA, Kazuhiro)  
国立研究開発法人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  
研究者番号：70541738

(2)研究分担者

横田 信英 (YOKOTA, Nobuhide)  
東北大学・電気通信研究所・助教  
研究者番号：00734542