

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23310094

研究課題名(和文)電子スピン制御による半導体レーザーの閾値低減に関する研究

研究課題名(英文) Study of lasing threshold reduction caused by electron spin polarization in the active region of laser diodes

研究代表者

黄 晋二 (Koh, Shinji)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：50323663

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円、(間接経費) 4,290,000円

研究成果の概要(和文)：電気的スピン注入によって面発光半導体レーザーを駆動することによって、円偏光でのレーザー発振やスピン偏極による発振しきい値の低減などのスピン偏極の効果を実験的に実証することを目指した。電気的スピン注入用電極として、GaAs(110)上のFe層やFePt層のMBE成長を行い、その構造と磁化特性の評価を進めた。作製した電極を用いて、GaAs/AlGaAs(110)量子井戸への低温でのスピン注入に成功した。しかしながら、発光の円偏光度は約5%と低く、GaAs(110)量子井戸が有する長い電子スピン緩和時間から期待される高い円偏光度は観測されなかった。

研究成果の概要(英文)：Vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) driven by electrical spin injection have been investigated. We focused on the circularly polarized lasing and lasing threshold reduction caused by spin polarization in the active region of the VCSELs. We have investigated molecular beam epitaxy growth of Fe and FePt layers on GaAs(110) surfaces for the spin injection electrodes, and characterized their structures and magnetic properties of the layers. We succeeded in the spin injection into GaAs(110) quantum wells at low temperature. However, the degree of the circular polarization of the emission observed was about 5% which was unexpectedly low. A high degree of circular polarization, which was expected because of the long spin relaxation time of the electrons in GaAs(110) quantum wells, was not observed.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノマイクロ科学・マイクロナノデバイス

キーワード：円偏光レーザー発振 スピン注入 半導体量子井戸 GaAs(110)

## 1. 研究開始当初の背景

半導体レーザー(LD)の活性層において電子のスピンド方向を揃えること(スピンド偏極)ができれば、光学選択則を介して円偏光レーザーを得ることができる。円偏光を出力するスピンドLDが実現すれば、レーザー発振に必要な反転分布が片側スピンド状態の電子についてのみ達成されれば良いため、スピンド無偏極状態と比べると、レーザー発振しきい値を最大50%まで低減できる。加えて、スピンド制御による直接変調の高速化が理論的に予想されており、これによって外部変調器が不要となればLD光源システムの低消費電力化につながる。スピンド制御によって動作電流の低減やLDシステムの低消費電力化を実現できれば、IT社会の省エネルギー化に貢献することができる。

これまでに、電氣的スピンド注入による面発光半導体レーザー(VCSEL)のレーザー発振が報告されているものの、報告は全てGaAs(100)上VCSELに関するものであり、スピンド制御の効果は活性層である(100)QWの非常に短い電子スピンド緩和時間 $\tau_s$ (約100ps)によって制限されてきた。一方、特殊な面方位のGaAs(110)上QWでは、主要なスピンド緩和機構であるD'yakonov-Perel機構が抑制されるために、(100)QWの10倍以上の長い $\tau_s$ (数ns)が得られる。この長い $\tau_s$ により、電子のスピンド偏極状態を発光再結合するまで、ほぼ完全に維持できることから、スピンドVCSELに極めて有利な面方位である。また、(110)QWでは、(100)QWとは逆に、高温ほど $\tau_s$ が長くなるため、室温でのスピンドVCSEL動作に関して極めて有利である。研究代表者はGaAs(110)上の分子線エピタキシー(MBE)成長について系統的な実験を進め、(110)スピンドVCSELの光励起下円偏光レーザー発振に成功している。

本研究では、これまでの光励起円偏光レーザー発振などの実績を基に、電氣的スピンド注入

によるレーザー発振へ向けて研究を展開し、(110)スピンドVCSELにおけるレーザー発振しきい値の低減を実証することを主眼とする。

## 2. 研究の目的

本研究では、研究期間内に

(1) GaAs(110)上のFeエピタキシャル成長技術を確立すること

(2) Fe電極を用いてスピンド発光ダイオード(LED)へのスピンド注入を行い、注入効率の評価を行うこと

(3) Fe電極を有するスピンドVCSELを作製し評価を行うこと、  
の研究項目を達成することを目的とした。

## 3. 研究の方法

MBE成長法を用いてFe/AlGaAsヘテロ構造のエピタキシャル成長を行い、このヘテロ構造のショットキー障壁トンネル伝導を用いてスピンド注入を行う。GaAs(110)基板上スピンド発光ダイオード(LED)を用いてスピンド注入効率を評価し、室温において最大のスピンド注入効率を得られる作製条件、デバイス構造を探索する。この条件を反映した(110)スピンドVCSELを作製し、評価を行った。

## 4. 研究成果

以下、本研究において得られた成果を項目別に述べる。

(1) GaAs(110)上のFe成長

(110)GaAs量子井戸への電氣的スピンド注入を行うために、まず、GaAs(110)基板上にFe薄膜結晶をエピタキシャル成長する技術について検討を行った。半導体と磁性金属の結晶成長には異なるMBE装置を用いており、MBE装置間を移送する際の表面汚染、酸化を防ぐため、試料表面にAsパッシベーション保護膜を形成する技術を確立した。磁性金属用MBE内での熱処理によってAs保護膜を除去し、Fe膜のエピタキシャル成長を行っ

た。成長中の反射高速電子線回折 (RHEED) 観察を通して、基板温度が室温付近である場合、Fe 膜の成長は、まず島状に成長し、その後平坦化していく Vollmer-Weber 型の成長モードとなることが分かった。成長した Fe 膜について、X 線回折測定、及び試料振動型磁力計 (VSM) 測定を用いた評価を行い、Fe 膜が単結晶であること、Fe 膜の結晶方位が、GaAs(110)上に対して面直方向、面内方向ともに整合していること、Fe 膜の磁化容易軸は膜面内の[001]であること、が分かった。

### (2) Fe 電極を用いたスピン注入

(110) GaAs 量子井戸を発光層とするスピン発光ダイオード (LED) を作製について検討を行い、デバイスプロセス技術を確立した。スピン LED では、トンネルバリアとして Fe/n-AlGaAs ショットキー接合を利用した。外部面直方向磁場下の電流注入発光における円偏光度を測定したところ、測定温度 4 K において、外部磁場が 2~3 T 付近で円偏光度の飽和が確認され、電気的スピン注入に成功した。しかしながら、観測された円偏光度は約 5%と低い値であり、Fe/AlGaAs 界面の欠陥の影響によって注入効率が低下したと考えられる (図 1)。

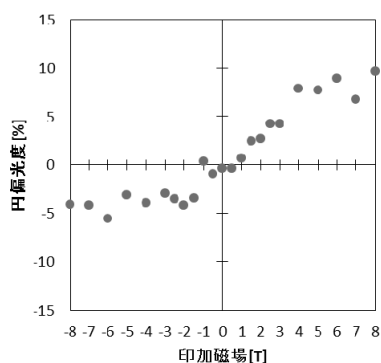


図 1 : Fe/AlGaAs(110) スピン LED からの発光円偏光度の外部磁場強度依存性。

### (3) GaAs(110)基板上 FePt 層の成長

(110)GaAs 量子井戸への無外部磁場下でのスピン注入を目指して、垂直磁化特性が報告

されている FePt について研究を行った。GaAs(110)基板上に Fe 層と Pt 層を交互に MBE 成長し、その磁化特性を調べた。比較的高温の 230 で FePt を成長した場合に、小さいながら外部磁場ゼロにおける残留垂直磁化成分が観測された。これは無外部磁場でのスピン注入の可能性を示唆する結果である (図 2)。しかしながら、高温成長のために FePt/GaAs の界面において混晶化が起こり、接合特性がオーミックになってしまうことが分かった。このため、ショットキー接合におけるトンネルバリアを用いたスピン注入は困難であり、MgO 層などの絶縁層を挿入する必要があることが分かった。

本実験を通し、[110]方向への垂直磁化特性を実現することは難しいという感触を得た。Cubic の結晶構造を持つ磁性体にとって、磁化容易軸が、対称性の高い<100>方向となることは、系のエネルギーを低くするという観点から自然なことと言えるが、これを異方性の高い<110>方向に変えるには、歪みや形状加工などの特殊な細工を施す必要があるだろうと思われる。

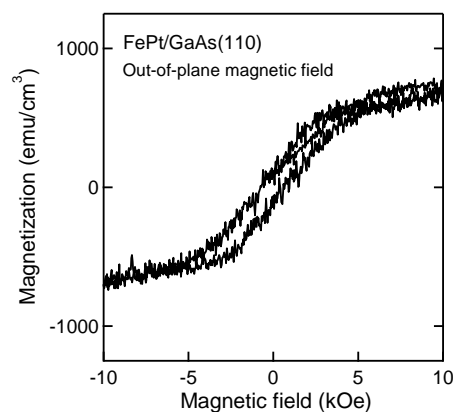


図 2 : Magnetization curve of FePt/GaAs(110) measured by out-of-plane magnetic field.

### (4) InP(110)基板上の InGaAs/InAlAs 量子井戸の MBE 成長

GaAs と同じ閃亜鉛鉱構造を持つ InP についても、もし良質な(110)量子井戸を形成する

ことができれば、DP スピン緩和が抑制され長い電子スピン緩和時間を得ることができると期待される。InP 基板上であれば、光通信帯で用いられている 1.55 マイクロメートル波長帯の量子井戸を作製できるため、円偏光でレーザ発振する面発光半導体レーザの光通信への応用が期待できる。InP(110)基板を用いて、成長温度、III/V フラックス比などの MBE 成長条件を系統的に変化させた実験を行い、明瞭なフォトルミネッセンスと量子準位を反映した吸収スペクトル (図 3) が観測できる InGaAs/InAlAs(110)量子井戸を成長できる条件を見出した。今後、この量子井戸についての電子スピン緩和時間の評価を進める予定である。

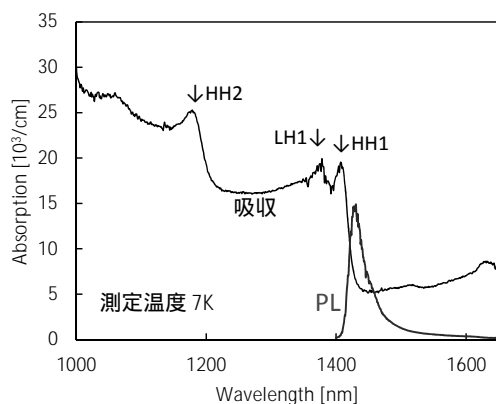


図 3 : InP(110)微傾斜[111]B 20QWs の透過および PL スペクトル

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

1. Y. Yasuda, S. Koh, K. Ikeda, H. Kawaguchi, “Crystal growth of InGaAs/InAlAs quantum wells on InP(110) by MBE” J. Cryst. Growth, 364, pp. 95-100 (2013) 査読有  
10.1016/j.jcrysgro.2012.11.039
2. S. Iba, S. Koh, and H. Kawaguchi, “Circularly polarized lasing over wide wavelength range in spin-controlled

(110) vertical-cavity surface-emitting laser,” Solid State Commun. **152**, pp. 1518-1521, (2012) 査読有  
10.1016/j.ssc.2012.06.009

3. 黄晋二, 揖場聡, 池田和浩, 河口仁司 「電子スピン緩和ダイナミクスの制御と半導体レーザの円偏光レーザ発振」表面科学 32 巻、第 10 号 pp755-760 (2011) 査読有  
10.1380/jsssj.32.755
4. S. Koh, K. Ikeda, and H. Kawaguchi, “Correlation between Morphology and Electron Spin relaxation Time in GaAs/AlGaAs Quantum Wells on Slightly Misoriented GaAs(110) substrates” J. Appl. Phys. **110**, 043516 (2011) 査読有  
10.1063/1.3622586

〔学会発表〕(計 8 件)

1. S. Koh, S. Iba, K. Ikeda and H. Kawaguchi, “Circularly Polarized Lasing in Spin-Controlled Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers” (招待講演) International Conference of the Asian Union Magnetic Society (ICAUMS 2012), Oct. 4, 2012, Nara, Japan.
2. 安田祐介, 黄晋二, 河口仁司 「MBE 法による InP(110)基板上 InGaAs/InAlAs 量子井戸の結晶成長」第 73 回応用物理学会学術講演会講演予稿集、愛媛大学、2012 年 9 月 11 日
3. 阿野浩一郎, 黄晋二, 河口仁司 「GaAs(110)基板上の Fe 及び FePt の成長」第 73 回応用物理学会学術講演会講

演予稿集、愛媛大学、2012年9月11日

4. S. Iba, S. Koh, K. Ikeda and H. Kawaguchi, "Circularly polarized lasing in (110) quantum well based spin-laser", (招待講演), SPIE NanoScience and Engineering, Aug. 16, 2012, San Diego, USA.
5. 横田信英、池田和浩、片山健夫、黄晋二、河口仁司、「GaAs/AlGaAs MQW の電子スピン緩和時間測定法に関する検討」秋季、第72回応用物理学会学術講演会講演予稿集、山形、2011年9月1日
6. 揖場聡、黄晋二、池田和浩、河口仁司、「(110)スピン面発光半導体レーザの広帯域円偏光発振」秋季、第72回応用物理学会学術講演会講演予稿集、山形、2011年9月1日
7. S. Iba, S. Koh, K. Ikeda and H. Kawaguchi, "Optically-pumped circularly polarized lasing in a (110) VCSEL with GaAs/AlGaAs QWs at room temperature," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2011), JTuI92, Baltimore Convention Center, May 3rd, 2011.
8. 揖場聡、黄晋二、池田和浩、河口仁司、「光スピン注入(110)GaAs 量子井戸面発光半導体レーザの室温円偏光発振」2011年(平成23年)春季、第58回応用物理学会関係連合講演会講演予稿集、27a-KM-7, p. 10-124, 厚木、2011年3月27日

{図書}(計0件)

{産業財産権}

出願状況(計1件)

名称:「不揮発性光メモリ、光記憶装置、ネットワークルータ」  
発明者:河口仁司、池田和浩、黄晋二  
権利者:河口仁司、池田和浩、黄晋二  
種類:特許出願  
番号:2011-073051  
出願年月日:平成23年3月  
国内外の別:国内

取得状況(計0件)

6. 研究組織  
(1)研究代表者

黄晋二(KOH, Shinji)  
青山学院大学・理工学部・電気電子工学科・准教授  
研究者番号:50233663

(2)研究分担者  
なし

(3)連携研究者

河口仁司(KAWAGUCHI, Hitoshi)  
奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・教授  
研究者番号:40211180

池田和浩(IKEDA, Kazuhiro)  
奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・助教  
研究者番号:70541738