

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：14603

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656051

研究課題名（和文）スピン面発光半導体レーザを用いた不揮発光メモリ

研究課題名（英文） Nonvolatile optical memory with spin vertical-cavity surface-emitting lasers

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：本研究の不揮発光メモリは、電子スピン緩和時間が長い GaAs(110) 基板上面発光レーザを用いるが、情報の読出動作に、スピン偏極電流注入による円偏光発振が必要である。まず、常磁性電極を用いたスピン非偏極電流注入によるレーザ発振に取り組んだが、デバイス構造の改善が必要であることが分かった。しきい値を下げるための酸化狭窄構造、および結晶性の低下する上側分布ブラッグ反射鏡を通さない電流注入構造を検討し、これらの作製プロセスを確立した。

研究成果の概要（英文）：Our nonvolatile optical memory utilizes a vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) grown on GaAs(110) substrate which has a long electron spin relaxation time. The readout is done by circularly polarized lasing with electrical spin injection. As the first step, we tried to demonstrate lasing under spin unpolarized current injection using a paramagnetic contact. However, it was found that the improvement of the VCSEL structure is necessary. An oxidized current confinement structure for reduction of threshold current, and a structure for current injection at a layer under the upper DBR with a lower crystal quality were investigated, and their fabrication processes have been established.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：総合理工

科研費の分科・細目：応用物理学・光工学・光量子科学

キーワード：光情報処理、光エレクトロニクス、光制御

1. 研究開始当初の背景

年率 40% におよぶ通信量の増加に対応するために、速度・消費電力の観点からネットワークの全光化が求められている。全光型パケットルータの基幹装置となる光バッファメモリを実現することは最も重要なステップの一つであり、これまでに、可変遅延や光ビットメモリが提案されているが、現時点で複雑さや消費電力の観点から実用的な候補は見当たらない。一方、半導体メモリ分野においては、電子スピンを用いたスピントロ

ニクスが脚光を浴びており、2006 年に MTJ (Magnetic Tunnel Junction) を用いた不揮発、無限回書換可能な MRAM (Magnetoresistive RAM) が製品化されて以来、多くの研究機関・企業の関心を集め、現在はスピン注入書込による 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 に限らず、新機能スピnde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。

本研究代表者の所属講座では、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スピン光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 VCSEL の円偏光発振に成功している。本研究代表者は、この VCSEL 上に形成した強磁性薄膜の光信号によるスピン注入磁化反転（書込み）、および VCSEL のスピン注入による円偏光発振（読出し）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。

2. 研究の目的

半導体上への垂直磁化強磁性薄膜電極の形成技術を検討し、光励起によるスピン注入磁化反転を用いた光情報の書込み、およびスピン偏極電子の電気的注入による VCSEL の円偏光発振を用いた光情報の読出しに組み込み、実現に向けた課題を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) Fe 電極による GaAs (110) 基板上量子井戸へのスピン注入

本研究の不揮発光メモリにおける読出し動作は「垂直磁化電極からのスピン注入による VCSEL の円偏光発振」である。強磁性電極から半導体への効率的なスピン注入には、接合界面におけるショットキー障壁によるトンネル現象をうまく制御する必要があり、強磁性電極の特性以上に半導体側のドーピング濃度や界面状態なども大きく影響する。また、半導体へのスピン注入効率を評価するためには、図 1 のように強磁場を用いた微弱 EL 発光の偏光測定系を構築する必要がある。従って、垂直磁化電極の形成技術が立ち上がるまでの間、Fe（面内磁化電極：学内設備により成長可能）を用いた GaAs (110) 基板上量子井戸へのスピン注入実験を行い、垂直磁化電極を用いたスピン注入を実現する上で必要な技術の確立を進めた。

GaAs (110) 基板上 PIN 構造 (LED) 上に、図 1 と同じ様に（図中 FePt の代わりに）Fe 電極を 10nm 成長し、その上に Au 電極を形成し

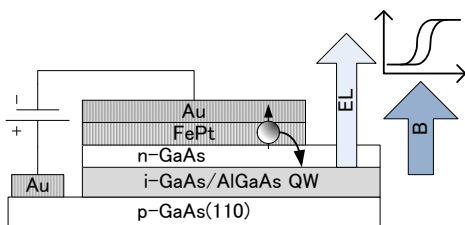


図 1. EL の円偏光度によるスピン注入効率の評価

た。このデバイスに順バイアス電圧を印加し、EL 発光を観測している状態で、外部から面直方向に強い磁場を印加し、Fe の磁化を垂直方向に向かせる。EL 発光の円偏光度（=（右回り成分-左回り成分）/総発光量）は量子井戸中の電子のスピン偏極度を直接反映することから、EL 円偏光度の磁場依存性を調べることにより Fe からのスピン注入効率を評価できる。

(2) (110)VCSEL の発振波長依存性の評価

これまで実証してきた光励起 (110)VCSEL では、レーザ発振波長（共振器の共振波長）が、量子井戸の伝導帯-重い正孔帯間遷移(e-hh)のエキシトン共鳴波長となる場合に、しきい値や発振光の円偏光度などの評価を行ってきた。しかし、電流注入型の VCSEL を作製する場合、どの程度の波長のトランスがあるかを知ることは、特にエピウエハに膜厚の面内分布が存在する MBE 成長の場合には重要である。そこで、スピン注入 VCSEL の特徴であり、本研究の光メモリの読出しにおいて必要である高い発振円偏光度およびその発振しきい値について、レーザ発振波長が e-hh のエキシトン共鳴波長からずれた場合の影響について調べた。

(3) 磁気光学カー効果による磁化測定法の開発

本研究では、垂直磁化電極の磁化特性について、振動試料型磁力計を用いて主に評価を行う。しかし、光学的な測定方法である、磁気光学カー効果(MOKE)測定を用いればプローブ光の集光スポットサイズ程度の空間分解能で磁化特性の面内分布や、スピン拡散の測定が可能であり、垂直磁化電極スピン VCSEL における詳細な評価を行う上で必要なツールとなる。そこで、ポンプ・プローブ MOKE 測定系を立ち上げ、これまで我々が光励起スピン VCSEL や PL 評価に使用してきた、ストリークカメラを用いた時間分解測定系との比較を行った。

4. 研究成果

(1) Fe 電極による GaAs(110) 基板上量子井戸へのスピン注入

当初作製した Fe-(110)LED の EL 円偏光度の磁場依存性において、Fe は 2T 付近で飽和磁化を示すはずであるが、飽和特性が観測されなかった。今回 Fe との接合層として使用した (110) AlGaAs 層は、(100) 基板上のものに比べ、n 型ドーピング (Si) が入りにくい傾向があるため、半導体側のドーピング濃度が設計より低くなりショットキー障壁の幅が広がった可能性がある。その結果、トンネル効果によるスピン注入が発現しなかったのではないかと考えた。そこで、よりドーパントが入りやすい条件として、成長時の基

板温度を低下 (480 → 400°C) させて、(110)Al_{0.1}GaAs 単膜に対するホール測定によるドーピング条件出しを行ったところ、 $9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア濃度が得られた。この条件を使って、再度 Fe 電極(110)LED を作製し、EL 円偏光度の磁場依存性を測定したところ、2~3T での飽和特性を確認した(図2)。Fe 膜の面直方向の飽和磁場と合致しており、スピン注入現象が確認できたと言える。今後はデバイス構造を改善し、円偏光度(スピン注入)の向上に取り組む。また、垂直磁化電極の形成については研究を進行中であるが、今回のデバイス作製技術、測定技術を適用して、垂直磁化電極によるスピン注入実験を試みる。

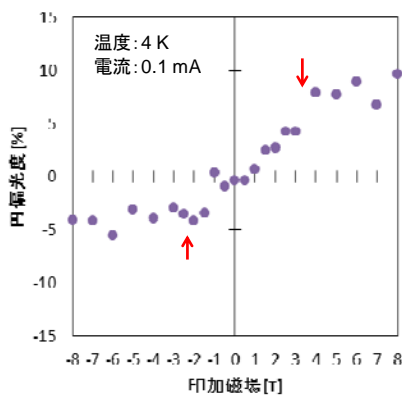


図2. Fe(110)LED の EL 円偏光度の磁場依存性

(2) (110) VCSEL の発振波長依存性の評価

図3に発振円偏光度 P_c 、右回り(σ+)および左回り(σ-)円偏光成分の発振しきい値 I_{th} 、そして発振スペクトルの波長依存性を示した。室温における光励起による結果である。発振スペクトルの波長依存性から、e-hh エキシトン共鳴波長から伝導帯-軽い正孔帯遷移(e-lh)エキシトン共鳴波長に渡る広い波長範囲において、ほぼ完全なσ+円偏光で発振していることが分かる。光学遷移のスピン選択則によれば、e-lh 遷移では、e-hh 遷移における発光円偏光とは逆の円偏光を発するが、今回の結果では e-hh 側で e-lh 側よりも P_c が高く、 I_{th} が低い傾向が見られたものの、e-lh でも e-hh と同じσ+円偏光で発振した。これは、比較的強励起状態である上に、1h と hh の分裂エネルギーが 10meV 程度と小さいことから、e-hh 遷移と e-lh 遷移の重なりが大きく、e-hh 遷移の寄与が支配的であるためであると考えられる。実際に、上側 DBR を除去し、活性層の PL スペクトルを測定したところ、e-hh ピークと e-lh ピークが強励起状態においてほぼ重なり、スペクトル全

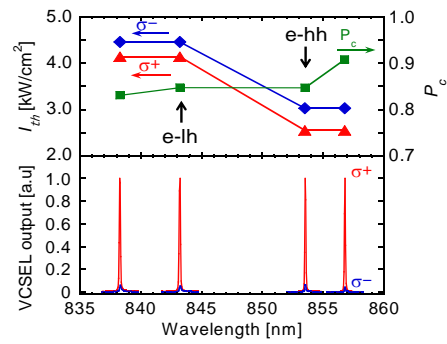


図3. 発振円偏光度 P_c 、右回り(σ+)および左回り(σ-)円偏光成分の発振しきい値 I_{th} 、発振スペクトルの波長依存性

域にわたりσ+成分の強度の方が強かった。以上の実験により、共振器の共振波長と量子井戸の発光波長のマッチングのトレランスは比較的大きいことがわかった。これはスピン VCSEL の設計において重要な知見である。

(3) 磁気光学カー効果による磁化測定法の開発

立ち上げたポンプ・プローブ MOKE 測定系を図4に示した。円偏光ポンプパルスにより半導体中にスピン偏極電子を励起する。このスピン偏極電子によるカー回転角度σ+を直線偏光プローブパルスの偏光回転角度により測定する構成である。この系により測定された(110)量子井戸の電子スピン緩和時間は、ストリークカメラによる測定系による測定結果と一致し、磁化測定法として機能していることを確認した。なお、今回は測定系の評価の目的で、半導体中にスピン偏極電子を励起するためにポンプ・プローブ系としているが、垂直磁化電極の磁化特性を測定する場合には、ポンプ光は必要なく、外部磁場に対するプローブ光のカー回転角度の変化を検出する。

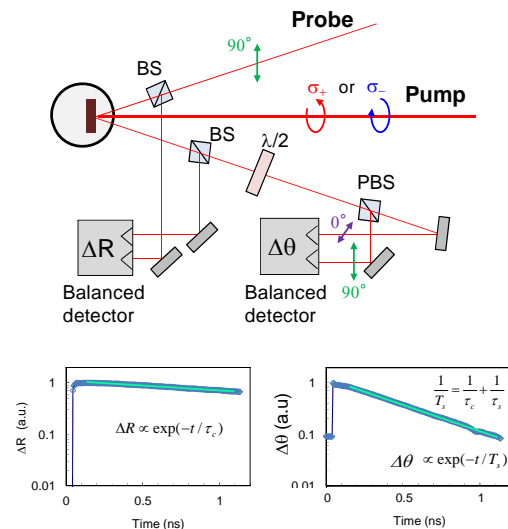


図4. ポンプ・プローブ MOKE 測定系

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

① S. Iba, S. Koh, K. Ikeda, and H. Kawaguchi, "Circularly polarized lasing over wide wavelength range in spin-controlled (110) vertical-cavity surface-emitting laser," *Solid State Commun.* 152, 1518-1521 (2012). 査読有
DOI: 10.1016/j.ssc.2012.06.009

② N. Yokota, K. Ikeda, and H. Kawaguchi, "Comparison of measurement techniques for electron spin relaxation time in a GaAs/AlGaAs multiple quantum well," *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* 44, 1176-1181 (2012). 査読有

DOI: 10.1016/j.physe.2012.01.006

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* Vol. 32, No. 12, pp. 755-760, 2011. 査読有
DOI: 10.1380/jsssj.32.755

[学会発表] (計5件)

① 池田和浩、好井淳平、河口仁司、“顕微PL法を用いた電子スピン緩和時間測定におけるスピン拡散効果”、2012 秋季応用物理学会学術講演会 14a-H6-3、松山、2012 年 9 月 14 日.

② S. Iba, S. Koh, K. Ikeda, and H. Kawaguchi, "Circularly polarized lasing in (110) quantum well-based spin laser," (招待講演) SPIE Optics + Photonics 2012, paper 8461-56, San Diego, CA, 2012 年 8 月 16 日.

③ 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室温円偏光発振特性”、The 16th Symposium on the Physics and Application of Spin-Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-16), F6, 東京、2011 年 11 月 29 日.

④ 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”、2011 年秋季応用物理学会学術講演会 1p-S-5、山形、2011 年 9 月 1 日.

⑤ 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”、2011 年秋季応用物理学会学術講演会 1p-S-8、山形、2011 年 9 月 1 日.

[その他]

ホームページ

<http://www1.ocn.ne.jp/~kazikeda>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし