

# 研究成果概要書

助成対象事業名	スピン面発光半導体レーザに関する国際共同研究
助成対象事業者 (研究代表者名)	奈良先端科学技術大学院大学 (河口仁司)
<b>1 事業の概要</b> <p>本国際共同研究では、電子スピンの偏極状態に依存して円偏光発振するスピン面発光半導体レーザ(VCSEL)について、金属を用いたナノスケール共振器を導入し、電流注入によるナノサイズのスピン VCSEL を実現するための理論的・実験的研究を行う。</p> <p>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と呼ばれる分野が注目されている。その中で、円偏光発光するスピン発光ダイオードは、半導体中の電子スピン状態を直接的に観測するための手段として利用されている。これにレーザ共振器を付加したスピンレーザは、電子のスピン偏極に依存して選択的に左右円偏光発振するため、光通信技術における大容量化のための偏光符号化や、セキュリティ向上のための量子暗号鍵配送の光源としての応用も期待されている。</p> <p>奈良先端大の研究グループでは、電子スピン緩和時間の長い(110)GaAs 基板上にエピタキシャル成長させた VCSEL の光励起スピン注入による円偏光発振に初めて成功しており、その発振円偏光を 1 GHz でスイッチングすることにも成功した。このスピン VCSEL をより実用的なデバイスとするためには、電流注入により発振させ、また、共振器の微小化による低しきい値化をはかる必要がある。一方、光モードのナノスケールへの局在化に有用な技術として、表面プラズモンポラリトンを用いた、プラズモニクスと呼ばれる分野の研究が盛んである。表面プラズモンポラリトンの波長は光の波長に比べて短いため、ナノスケール構造における局在が可能であり、ナノ光回路やナノレーザなどへの応用が期待されている。カリフォルニア大サンディエゴ校の研究グループでは、プラズモン共鳴を用いたバイオセンサや、金属を用いた微小共振器レーザについての研究実績がある。バンゴ大のグループでは、VCSEL の理論的な計算・解析について実績がある。そこで本国際共同研究では、それぞれの得意とする技術を持ち寄り、金属を用いてレーザ共振器を極微小化した電流注入スピン VCSEL について理論的・実験的研究を行う。</p>	
<b>2 共同研究体制と分担内容</b> <p>奈良先端科学技術大学院大学 河口を研究代表者として、奈良先端科学技術大学院大学、University of California, San Diego、Bangor University の 3 大学が共同で研究を行った。研究代表者及び共同研究者は以下のとおりである。</p> <p>研究代表者：河口 仁司 (奈良先端科学技術大学院大学) 共同研究者：黄 晋二、片山 健夫、池田 和浩 (奈良先端科学技術大学院大学) Yeshaiah Fainman (University of California, San Diego) Keith Alan Shore (Bangor University)</p> <p>【分担内容】 奈良先端大 ・(110)量子井戸の結晶成長の品質向上 ・(110)量子井戸のナノポスト加工がスピン偏極度へ与える影響 ・スピン偏極電子注入のための強磁性金属電極の検討 バンゴ大 ・金属ナノレーザにおける発振偏光特性の解析 カリフォルニア大サンディエゴ校 ・電流注入を考慮した、金属を用いた微小レーザ共振器の設計・最適化と作製・評価</p>	

### 3 事業の成果

平成 22 年度の 3 つの主要な研究成果について述べる。

#### (1) (110)GaAs 量子井戸中の電子スピン緩和時間の電圧制御

(奈良先端科学技術大学院大学の成果(1))

GaAs/AlGaAs 量子井戸は(100)GaAs 基板上に成長されるのが一般的である。(110)GaAs 基板上量子井戸は、分子線エピタキシ(MBE)法で成長する場合、良質な結晶の得られる成長条件が狭く作製が難しい。しかし、数ナノ秒におよぶ非常に長い電子スピン緩和時間をもつという特徴があり、これを印加電圧により広いダイナミックレンジで変調できる可能性がある。電子スピン緩和時間とは、電子のスピンが揃った状態から、ランダムな状態へ変化する時間を言う。これまでに報告された(110)GaAs/AlGaAs 量子井戸における電子スピン緩和時間の制御は低温 (230 K 以下) に限られており、室温での実証報告はない。そこで、p-i-n 構造を利用して(110)GaAs/AlGaAs 量子井戸の電子スピン緩和時間の室温での電圧制御を検討した。その結果世界で初めて室温において、約 20 V の印加電圧により電子スピン緩和時間を 1 桁変調した。この成果は、今後スピノプトエレクトロニクス分野で広く用いられると期待される。

#### (2) 光スピン注入(110)GaAs 量子井戸 VCSEL の室温円偏光発振

(奈良先端科学技術大学院大学の成果(2))

通常の半導体レーザでは、光利得を得るためスピンの方向がランダムな電子が注入される。これにより面発光半導体レーザ (VCSEL) は直線偏光でレーザ発振する。一方、スピンの方向が揃った電子を VCSEL の活性層に注入すると、GaAs など III - V 族化合物半導体のもつ光学的な性質から、円偏光でレーザ発振する。このような VCSEL をスピン VCSEL と呼んでいる。スピン VCSEL では、円偏光度が 1 に近い高い値で発振することが重要である。我々は(110)InGaAs/GaAs 量子井戸を活性層とした VCSEL を作製し、光スピン注入により 77 K で高い円偏光度を持つレーザ発振 (円偏光度 0.9 以上) に成功したが、室温では円偏光発振が得られなかった。室温で長いスピン緩和時間が得られ、かつ、高品質な結晶の成長ができ、スピン VCSEL の活性層として有望である(110)GaAs/AlGaAs 量子井戸を活性層として用いたスピン VCSEL を作製し、室温における光励起円偏光レーザ発振に世界で初めて成功した。この成果により、電流注入スピン VCSEL 実現の目途が立った。

#### (3) 長距離伝搬表面プラズモンポラリトンモードの解析 (3 研究機関の共同研究の成果)

近年、金属被覆したナノレーザが注目されており、光の回折限界を超えた微小化が可能になってきている。金属被覆ナノレーザにおいて、最も小さな領域に閉じ込められる伝搬モードは、金属とコアの境界に局在する最低次の表面プラズモンポラリトンモード (SPP) である。SPP は金属表面において、金属中の自由電子の集団振動 (表面プラズモン) と電磁界振動とが結合したポラリトンと呼ばれる波として伝搬するモードのことを言い、金属表面に局在するためナノスケールの光閉じ込めが実現できるが、金属による損失が大きい。もう一つの興味深いモードとして、損失の小さい長距離伝搬可能な SPP モードが存在し、極薄の平板や円柱状の金属膜に対して研究されている。この SPP モードは小さな導波構造でも存在し、かつ低損失であるが、利得媒質である半導体コアとのモードの重なりが非常に小さく、効率的な光利得が得られないという欠点がある。そこで、本研究ではクラッド層の屈折率を半導体コアに近い値にまで大きくすることで、コアとのモード重なりを大きくする手法を考案した。このような新しい成果は、3 研究機関が共同研究を実施して初めて得られるものである。共著で論文 (K. Ikeda, Y. Fainman, K. Alan Shore, and H. Kawaguchi, Modified long-range surface plasmon polariton modes for laser nanoresonators) を投稿した。又、現在、試作が可能か検討している。

平成 22 年度の研究成果をもとに、平成 23 年度以降は以下の事項を検討する。

- (1) 金属ナノレーザの構造の改良
- (2) 強磁性金属電極を用いた電流注入スピン VCSEL の作製・評価
- (3) 電流注入スピン VCSEL の発振円偏光スイッチングの実証