

機関番号：14603

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21810017

研究課題名（和文） スピンナノレーザに向けたスピン偏極電子集団の光学応答に関する研究

研究課題名（英文） Research on optical responses of a spin-polarized electron group for spin-nanolasers

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）：レーザをナノポスト形状に加工するためのナノ加工技術を確立した。その上で、活性層として考えている(110)基板上量子井戸の長い電子スピン緩和時間がナノ加工後も維持されることを実験的に確認し、スピンレーザをナノポスト化しても円偏光発振を得られる可能性があることを明らかにした。また、スピンレーザのナノスケール化のために金属を用いた長距離伝搬表面プラズモンポラリトンモードの検討を行い、効率的な増幅が得られる構造を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Nano-fabrication techniques for nano-post lasers have been established. Using the techniques, it has been experimentally confirmed that a long electron spin relaxation time in quantum wells on GaAs(110) (a prospective active layer for spin nanolasers) is preserved in nano-post structures, which indicated possibility of circularly polarized lasing in nano-post spin lasers. Furthermore, investigations on long-range surface plasmon polariton modes on metal-semiconductor structures to miniaturize spin lasers in nano scale have been conducted, which clarified a new structure to obtain efficient mode amplification.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,080,000	324,000	1,404,000
2010年度	980,000	294,000	1,274,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,060,000	618,000	2,678,000

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：マイクロ・ナノデバイス、応用光学・量子光工学、光物性、スピントロニクス

## 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、集積度等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と呼ばれる分野が注目されている。その中で、半導体

中の電子遷移における吸収・発光過程のスピン選択則に従って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スピントロニクスの研究に利用されている。また、これにレーザ共振器を付加したスピンレーザは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化の光源としての応用も期待されており、多数の研究報告がある。本研究の研究代表者が所属する講座では、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面発光半導体レーザ (VCSEL) の光励起による円偏光発振に初めて成功しており、本研究代表者も着任後、その発振偏光特性の測定と解析に参画している。このスピンVCSELを電流注入により発振させ、実用的なデバイスとするためには、スピン注入電極の最適化や共振器の微小化による低しきい値電流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、金属表面の電子集団の振動と光の電磁場とが結合した波として伝搬する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。そこで本研究では、前記スピンVCSELにプラズモニクスを適用し、金属を用いてレーザ共振器を極微小化したスピナノレーザの構造を検討する。スピントロニクスとプラズモニクスの融合領域は未開拓の新しい分野であり、学術的なインパクトの大きい研究であると言える。

## 2. 研究の目的

本研究では、スピナノレーザの実現に向けて、スピン偏極した電子集団の光学応答について理論的・実験的に調べる。具体的には、マックスウェルの方程式を金属・誘電体界面において解き、表面プラズモンポラリトンモードの分散曲線やフィールド分布の解析から、ナノレーザに最適な構造を明らかにする。さらに、ナノレーザ加工をするためのナノ加工技術の開発を行うとともに、ナノ加工が活性層中のスピン物性に与える影響を実験的に調べる。

## 3. 研究の方法

(1) スピンレーザのナノスケール化のために表面プラズモンポラリトン (Surface Plasmon Polariton: SPP) モードを微小レーザ共振器に用いるための具体的な設計を、解析および数値計算により行った。これまで報告されている金属 - 半導体ナノレーザでは、最もモード断面積が小さくなる最低次のSPPモードによるレーザ発振は、金属中の自由電

子による減衰損失のために低温でのみ実現されている。本研究では、極薄い金属膜において、表裏の2つのSPPモードが結合することによって生じる、伝搬損失が小さい「長距離伝搬SPP」を用いてナノメートルスケールで且つ低損失となるレーザ構造を検討した。

(2) 金属を用いたナノレーザ共振器の作製においては、構造の主体となる半導体の形状制御が重要になる。今回、新たにHydrogen silsesquioxaneをベースとした電子線用ネガティブレジストを導入し、電子線描画の条件出しを行った後、電子サイクロトロン共鳴反応性イオンエッチング (ECR-RIE) によるGaAs基板のエッチング形状、選択比を評価した。

(3) ドライエッチング加工のスピン偏極電子への影響を調べるために、様々なポストサイズに加工したGaAs (110) 基板上多重量子井戸のキャリア寿命および電子スピン緩和時間を評価した。用いた測定系を図1に示す。

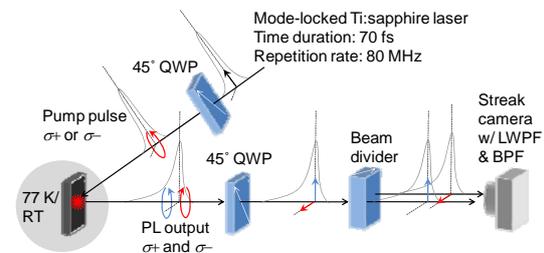


図1. キャリア寿命および電子スピン緩和時間の測定系

## 4. 研究成果

(1) 通常用いられる円筒状の金属被覆半導体構造において、長距離伝搬SPPをレーザ共振器に用いる上での欠点は、モード分布が金属被覆の外側に集中するため、利得媒質との重なり、すなわち閉じ込め係数が小さく、モード利得が十分に得られないことである。今回特に、金属被覆の外側のクラッド領域の屈折率を3.5程度に大きくすることにより、閉じ込め係数が改善されることを示した (図2)。

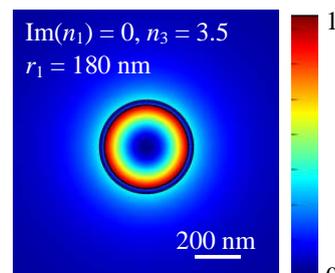


図2. 閉じ込め係数を改善した長距離伝搬SPPモードのパワー分布

また、この大きな屈折率は、金属被覆の外側を、利得を有する半導体とすることが出来ることを意味する。外側を利得領域としたほうがより効率的にモードを増幅できると考えられ、計算によりこれを確認した。このような構造は、例えばプラズマエッチングなどにより半導体に穴を掘り、金属を蒸着することにより可能であると考えられる。上記の知見は、スピナノレーザの設計において重要な指針を与えるものである。

(2) ECR-RIEにおいて、ガス流量を上げることにより 10 以上のエッチング選択比が得られ、5 $\mu\text{m}$ 以上の深堀が可能であることが分かった。また、200nm程度まで高いアスペクト比でのポスト加工を実現できた (図 3)。

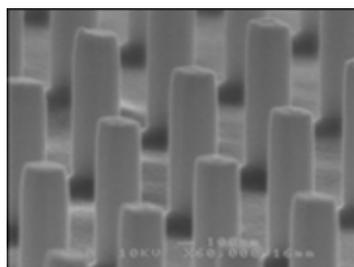


図 3. エッチング条件最適化後のナノポストの電子顕微鏡写真

(3) 図 4 に示すように、エッチング側面における表面再結合の影響によって、ポストサイズが小さくなるにつれてキャリア寿命が急激に短くなった。一方、電子スピン緩和時間については、ドライエッチングを施しても長い値を維持することが分かった。キャリア寿命が短縮される一方、電子スピン緩和時間は維持されることから、ドライエッチング加工によって、スピナノレーザの発振光の高速なスイッチングが期待できる。

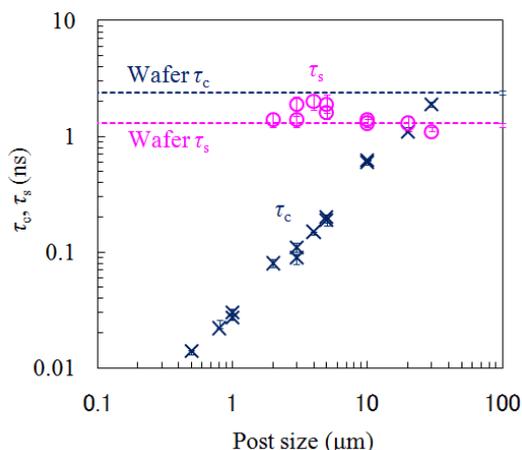


図 4. (110)GaAs量子井戸におけるキャリア寿命 $\tau_c$ と電子スピン緩和時間 $\tau_s$ のポストサイズ依存性

(4) 今後は長距離伝搬SPPの新しい構造を実

際にレーザ共振器に適用し、最適なナノレーザ構造を明らかにすると共に、金属に強磁性金属を想定し、スピン偏極を加味した場合のSPP伝搬、およびスピナノレーザの検討を進める。また、確立したナノ加工技術を用いて設計したナノレーザの作製を試みる。また、今回明らかにしたように、ナノポストに加工することによって、スピナノレーザの発振円偏光を高速にスイッチングできる可能性があるため、その実験実証にも取り組み、具体的なアプリケーションに向けた検討も行う。

## 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 1 件)

①N. Yokota, K. Ikeda, Y. Nishizaki, S. Koh, and H. Kawaguchi, "Carrier lifetime and electron spin relaxation time in (110)-oriented GaAs/AlGaAs quantum well micro-posts," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 22, 1689-1691, 2010, 査読有

[学会発表] (計 2 件)

①K. Ikeda, Y. Nishizaki, N. Yokota, K. Ohnishi, S. Koh and H. Kawaguchi, "Shortening of carrier lifetime and its effect on electron spin relaxation time in GaAs/AlGaAs (110) multiple quantum wells," International Conference on Nanophotonics 2010 (OSA Topical Meeting), 2010. 6. 1, Tsukuba, Japan

②池田和浩、西崎仁貴、横田信英、大西和樹、黄晋二、河口仁司、「GaAs/AlGaAs (110) 多重量子井戸のキャリア寿命の短縮と電子スピン緩和時間」、2010 年春季、第 57 回応用物理学会関係連合講演会、2010. 3. 17、神奈川

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページアドレス

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

## 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