

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26709027

研究課題名(和文)電子スピンを利用する円偏光レーザーの開発

研究課題名(英文)Development of spin-controlled laser with circularly polarized emission

研究代表者

揖場 聡(Iba, Satoshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・スピントロニクス研究センター・研究員

研究者番号：90647059

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,000,000円

研究成果の概要(和文)：近年、半導体中の電子スピン自由度をすることで円偏光出力を可能とするレーザー“スピンレーザー”が注目されている。我々は当該デバイスの実現に向けて基幹構造である活性層の特性向上に取り組んできた。分子線エピタキシー法による系統的な結晶成長実験を通して、(110)面GaAs量子井戸を利用すれば発光特性・スピン特性が大幅に向上することを実証した。本成果により(110)面GaAs量子井戸を利用した高性能なスピンレーザーの実現が期待される。

研究成果の概要(英文)：Spin-controlled lasers, which can emit circularly polarized coherent light, have become a focus of interest. Semiconductor quantum wells (QWs) are crucial building blocks of the spin-lasers. The main purpose of our research project is to improve characteristics of the QWs in order to realize high performance spin-lasers. In this study, we successfully demonstrated great improvement of optical and spin properties in the QWs by using (110)-oriented GaAs substrate through systematic crystal growth experiment. Our findings suggest that the newly developed (110) QWs indeed have greater advantages than the conventional (100)QWs for use in spin-lasers.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピン 円偏光 半導体量子井戸 結晶成長 発光

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体中の電子スピン自由度を積極的に利用した半導体レーザ“スピンレーザ”が注目を集めている。スピンレーザは円偏光のコヒーレント光を出力できるため、偏光-磁性体磁化間での情報転写や制御、また、カイラル物質のセンシングなど次世代光源として期待が大きい。スピンレーザでは半導体活性層においてスピン-円偏光変換が行われるため、活性層の発光・スピン特性が当該デバイスのパフォーマンスを大きく左右する。また、光出力を面発光型にする場合は表面平坦性も重要となる。

これまでスピンレーザの活性層には一般的な GaAs(100)面方位の量子井戸が採用されてきた。GaAs(100)量子井戸ではこれまで発光特性に関する多数の研究報告が存在するが、スピン特性の成膜条件依存性については必ずしも明らかではない。

一方、GaAs(110)面方位の量子井戸は室温においてナノ秒オーダーのスピン緩和時間が期待できるためスピンレーザの活性層として有力候補である。しかしながら当該量子井戸は結晶成長の困難さに起因して室温発光特性に関する研究事例は極めて限られている。また、磁性電極付き LED 構造を利用した(110)量子井戸への電気的スピン注入に関する論文は1件のみ存在するが、期待される円偏光発光特性が出ておらず、低い結晶品質が原因であると指摘されている。このように GaAs(110)量子井戸は優れたスピン特性を有するものの、実デバイスへ適用するためには結晶品質の向上が望まれていた。

2. 研究の目的

スピンレーザの活性層には優れたスピン特性・発光特性・表面平坦性を兼ね備える半導体量子井戸が必要である。そこで分子線エピタキシー(MBE)法による系統的な結晶成長実験を通して、これらの特性を両立できる成長技術を確認し、高性能スピンレーザの実現への道筋を見出すことを目的とする。

3. 研究の方法

試料の作製には固体ソース MBE 装置を利用した。試料構造はアンドープ GaAs 基板上の井戸層 GaAs 10 nm、障壁層 AlGaAs 20 nm から成る 20 層の多重量子井戸(MQW)である。なお、今回新規導入した MBE 装置の立ち上げも兼ねて、はじめに GaAs(100)基板上 GaAs/AlGaAs 量子井戸の作製に取り組み、その後 GaAs(110)基板を利用した実験に着手した。発光特性・スピン特性・表面平坦性の成長条件依存性を評価するにあたり、表1に示す成長条件で複数の試料を作製した。

作製した試料の表面平坦性は微分干渉光学顕微鏡とステッププロファイラを用いて評価した。また、光学特性およびスピン特性はストリークカメラを利用した偏光時間分解フォトルミネセンス(PL)法で評価した。

表1 MBE 成長条件

基板面方位	成長温度(°C)	As ₄ /Ga 比
100	530, 580, 630	7, 10, 13
110	400, 450, 500	20, 40, 60

4. 研究成果

(1) (100)GaAs/AlGaAs の成長条件依存性

As₄/Ga 比(V/III 比)7 の試料表面では大きな凹凸形状が観察され、ステッププロファイラによる表面粗さ Ra 値は 10 nm 以上であった。一方、V/III 比 10 および 13 の試料では Ra 値 1 nm 以下の平坦な表面を示した。

室温において測定したキャリア寿命 τ_c (発光寿命)および電子スピン緩和時間 τ_s を図1に示す。キャリア寿命は V/III 比に対して右肩下がり傾向を示し 9 ns から 0.1 ns まで大きく変化した。GaAs 量子井戸の室温におけるキャリア寿命は一般に非輻射再結合寿命に支配されているため、V/III 比が高いほど非輻射再結合センターが増加していることが示唆される。これは過剰 As 原子が格子間に入り込む格子欠陥等が原因であると考えられる。一方、スピン緩和時間はほとんど成長条件依存性を示さず 0.15 ns 程度の一定値であった。GaAs(100)量子井戸の室温における支配的なスピン緩和機構は D'yakonov-Perel (DP) タイプであることが知られている。DP 機構では運動量散乱時間とスピン緩和時間が反比例の関係になる。実験結果ではスピン緩和時間が成長条件に依存していないことから、運動量散乱時間も試料間で大きな差は生じていないと予測される。今回の実験では室温

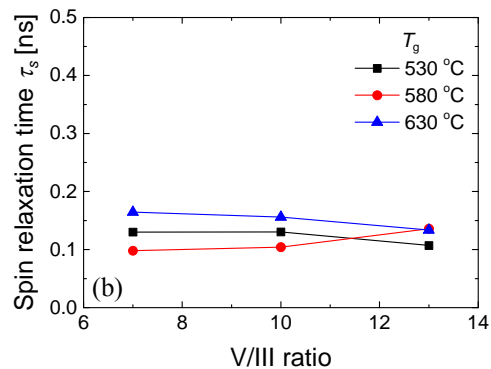
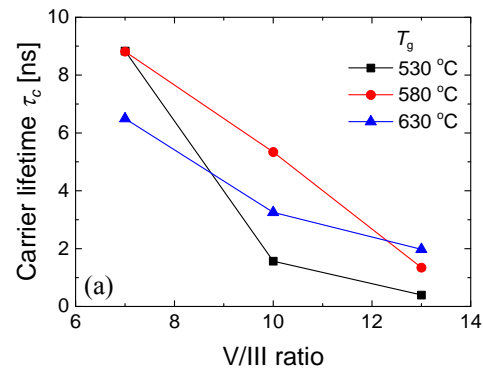


図1 (100)GaAs/AlGaAs MQW の(a)キャリア寿命 (b)電子スピン緩和時間

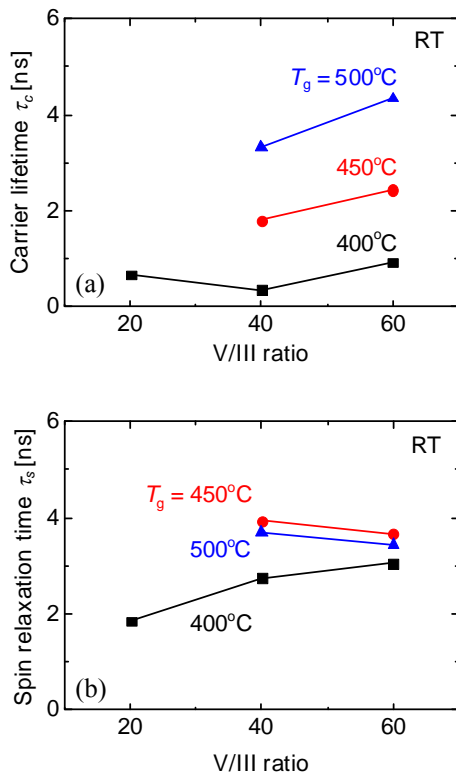


図2 (110)GaAs/AlGaAs MQW の(a)キャリア寿命 (b)電子スピン緩和時間

で測定しているため、結晶欠陥誘起の散乱よりも室温の強いフォノン散乱が支配的となり、スピン緩和時間が試料間で変化しなかったと考えられる。

(2) (110)GaAs/AlGaAs の成長条件依存性

As₄/Ga 比(V/III 比)20 または成長温度 500 の試料では表面に大きな凹凸形状が観察され、ステッププロファイラ による表面粗さ Ra 値は 2 nm 以上であった。一方、上記以外の成長条件では Ra 値 1 nm 以下の平坦な表面を示した。

室温において測定したキャリア寿命 τ_c および電子スピン緩和時間 τ_s を図 2 に示す。(100)量子井戸の傾向とは異なり、キャリア寿命は成長温度に対して強い依存性を示した。幾つかの試料では高品質結晶の目安である 1 ns 以上の値が得られており、(110)量子井戸でも高品位な結晶成長を実現可能であることが分かった。スピン緩和時間に関して、いずれの試料においてもナノ秒レベルの値を示し、かつ、キャリア寿命に比べて成長条件依存性が弱い。GaAs 結晶では Ga-As 原子間のイオン性結合に起因した強い有効磁場が電子スピンに作用する(DP 機構)。(110)量子井戸では強い有効磁場が光生成スピンと同方向(面直方向)に作用しているため、室温のフォノン散乱や結晶欠陥誘起の散乱はスピン緩和に大きな影響を与えていないことが示唆される。

作製した一連の(100)および(110)量子井戸における室温 PL 発光強度のキャリア寿命依存性を図 3(a)に示す。興味深いことに同程度のキャリア寿命であっても(110)量子井戸の

方が 3 倍程度発光強度が高い。室温のキャリア寿命は非輻射再結合センター密度に依存しているため、同程度の結晶品質であっても(110)試料の方が強発光を示すということの意味する。これは発光デバイスのプラットフォームとして(110)量子井戸が大変有望であることを示している。

活性層の重要な性能指数はスピンから円偏光への変換効率($\tau_s/(2\tau_c+\tau_s)$)と電子から光子への変換効率(発光効率)であるため、これらを評価軸として図 3(b)にまとめた。発光効率の簡易的な指標として、ここでは PL 発光強度を用いた。(110)量子井戸を利用することによりスピン-円偏光変換効率と発光効率が同時に大幅に向上していることが分かる。これらの成果により(110)面 GaAs 量子井戸を利用した高性能なスピンレーザの実現が期待される。

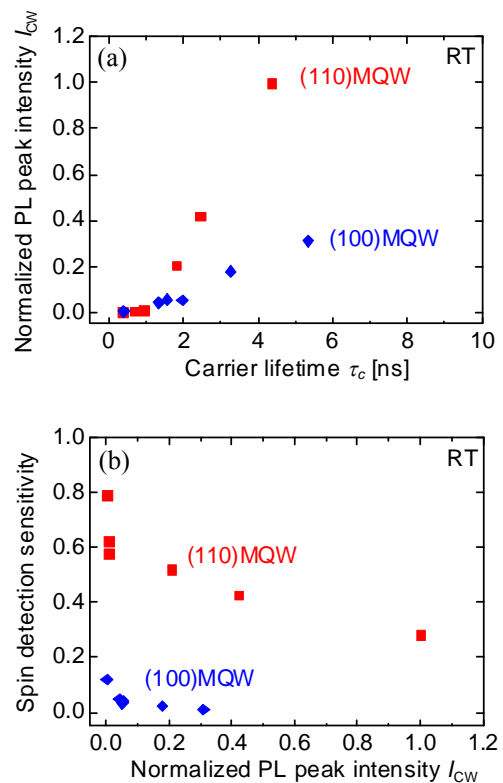


図3 成長条件を変えて成膜した(100)および(110)GaAs/AlGaAs MQW の諸特性 (a)発光強度とキャリア寿命 (b)スピン-円偏光変換効率と発光強度

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)

Satoshi Iba, Hidekazu Saito, Ken Watanabe, Yuzo Ohno, Shinji Yuasa, "Systematic study of surface morphology, photoluminescence efficiency, and spin-detection sensitivity in (110)-oriented GaAs/AlGaAs quantum wells", Japanese Journal of Applied Physics,

55, 113001-1-5 (2016). DOI:10.7567/JJAP.55.113001, 査読有
Satoshi Iba, Hidekazu Saito, Ken Watanabe, Yuzo Ohno, Shinji Yuasa, “Growth condition dependence of photoluminescence polarization in (100) GaAs/AlGaAs quantum wells at room temperature”, Journal of Applied Physics, 118, 83901 (2015). DOI: 10.1063/1.4928325, 査読有
Satoshi Iba, Hidekazu Saito, Shinji Yuasa, Yuhsuke Yasutake, Susumu Fukatsu, “Fabrication of Ge-based light-emitting diodes with a ferromagnetic metal/insulator tunnel contact”, Japanese Journal of Applied Physics, 54, 04DM02-1-4 (2015). DOI: 10.7567/JJAP.54.04DM02, 査読有

〔学会発表〕(計10件)

揖場 聡, 齋藤秀和, 大野裕三, 湯浅新治, “円偏光で発振する半導体スピンレーザーの開発”, ATI スピントロニクス研究会(招待講演), T K P ガーデンシティお茶の水, 東京, 2017年2月17日.

Satoshi Iba, Hidekazu Saito, Ken Watanabe, Yuzo Ohno, Shinji Yuasa, “Development of (110) GaAs quantum wells for emission layers of spin-controlled lasers”, International workshop on nano-spin conversion science & quantum spin dynamics, Univ. of Tokyo, Tokyo, October 14, 2016.

Satoshi Iba, Hidekazu Saito, Ken Watanabe, Yuzo Ohno, Shinji Yuasa, “Fabrication of (110)-oriented GaAs/AlGaAs quantum wells for spin-controlled light sources”, 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids, Kobe International Conference Center, Kobe, August 8, 2016.

Satoshi Iba, Hidekazu Saito, Ken Watanabe, Yuzo Ohno, Shinji Yuasa, “Temperature dependence of spin relaxation time in (110)-oriented GaAs/AlGaAs quantum wells”, 第63回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 東京, 2016年3月19日.

Satoshi Iba, Hidekazu Saito, Ken Watanabe, Yuzo Ohno, Shinji Yuasa, “Impacts of growth condition on photoluminescence polarization in (100)-oriented GaAs quantum wells at room temperature”, 13th Joint MMM-Intermag Conference, San Diego, USA, January 13, 2016.

Satoshi Iba, Hidekazu Saito, Ken Watanabe, Yuzo Ohno, Shinji Yuasa, “Growth condition dependence of carrier and spin lifetimes in GaAs/AlGaAs quantum wells at room temperature”, 第20回半導体におけるスピン工学の基礎と応用 PASPS-20, 東北大学, 仙台, 2015年12月3日.

揖場 聡, 齋藤秀和, 渡辺 健, 大野裕三, 湯浅新治, “スピン面発光レーザーの開発へ向けた(110)GaAs/AlGaAs量子井戸の高速 MBE 成長”, 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋, 2015年9月13日.

Satoshi Iba, Hidekazu Saito, Ken Watanabe, Yuzo Ohno, Shinji Yuasa, “Growth condition dependence of carrier and spin lifetimes in GaAs-based quantum wells”, SPIE Optics + Photonics (Invited), San Diego, USA, August 11, 2015.

Satoshi Iba, Hidekazu Saito, Ken Watanabe, Yuzo Ohno, Shinji Yuasa, “Growth condition dependence of carrier and spin lifetimes in GaAs/AlGaAs quantum wells at room temperature”, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 神奈川, 2015年3月11日.

Satoshi Iba, Hidekazu Saito, Shinji Yuasa, Yuhsuke Yasutake, Susumu Fukatsu, “Fabrication of Ge-based light-emitting diodes with a ferromagnetic electrode”, 2014 International Conference on Solid State Devices and Materials, Tsukuba International Congress Center, Ibaraki, September 10, 2014.

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称:半導体発光素子及びその製造方法

発明者:揖場聡, 齋藤秀和

権利者:国立研究開発法人産業技術総合研究所

種類:特許

番号:特願2016-13696

出願年月日:2016年07月11日

国内外の別:国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

揖場 聡 (IBA Satoshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・スピントロニクス研究センター・研究員

研究者番号:90647059