

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月25日現在

機関番号：16101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010年度～2011年度

課題番号：22760043

研究課題名（和文）インジウムヒ素量子ドット共振器中のスピンドイナミクスを利用した光応答制御

研究課題名（英文）Optical response using spin dynamics of InAs quantum dot cavity

研究代表者

森田 健（MORITA KEN）

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・特任講師

研究者番号：30448344

研究成果の概要（和文）：

スピン偏光回転による超高速光スイッチングの実現に向けて、高速キャリア緩和を可能とする Er 添加した InAs 量子ドットを有する半導体多層膜共振器構造（Er 添加量子ドット共振器）を作製した。Er 添加量子ドット共振器の構造とキャリア緩和特性は、光反射率スペクトルと時間分解透過率変化測定によって評価した。光通信波長（1.5 μm ）帯の光を用い、共振器内部の Er 添加した InAs 量子ドット中に高速緩和する（10 ps 以内）電子スピンの形成できることを円偏光ポンププローブ法によって明らかにし、スピンによる偏光回転を利用した超高速光スイッチングが可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：

We fabricated the GaAs/AlAs multilayer cavity with Er-doped InAs quantum dots (QDs) for the ultrafast all optical switching due to the electron spin polarization rotation. The structure and its carrier decay time were characterized by the optical reflection and time-resolved optical measurements, respectively. In the optical communication waveband ($\sim 1.5 \mu\text{m}$), we showed the fast decaying ($< 10 \text{ ps}$) electron spins are strongly polarized in the Er-doped InAs QDs in the cavity by the circular polarization time-resolved pump and probe methods. This indicates that the ultrafast all optical switching due to the electron spin polarization rotation is expected using the Er-doped InAs QD cavity.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用工学・量子光工学

キーワード：光制御

1. 研究開始当初の背景

新しい高度情報化社会の構築に向けて、光通信ネットワークの大容量化、超高速化は必要不可欠になっている。このような超高速、大容量光通信を目的とした基盤技術を確立していくためには、全てを光で動作させる全光システムが望まれている。これまで、光を光で制御できる超高速全光スイッチングデバイスが注目されてきたが、実用化のためには、超高速な光学応答と高い非線形光学効果を有する媒質を用いることが重要となる。高い非線形光学媒質を利用すれば、低損失で情報を伝達でき、環境を配慮した立場からも有効である。

半導体多層膜共振器を用いると、共振器内部の光電場強度が増大するため、高い非線形性が得られる。私の所属研究グループでは、この半導体多層膜共振器構造を用いた超高速光カーゲートスイッチを提案し、シミュレーションと実験を通して、その特性を明らかにしてきた。具体的には、GaAs/AlAs 多層膜共振器中の $\lambda/2$ 共振層に光通信波長帯(1.55 μm 帯) で大きな屈折率変化を有する InAs 量子ドットを挿入した構造(以下 InAs 量子ドット共振器) を作製し、その光カー信号強度が量子ドットを挿入してないものに比べて二桁近く増大できることを明らかにした。また基礎的な特性としても、微小共振器の多層膜を変化させると、光カー信号は Q 値に対して4乗に大きくなることも示した。内部の電場増大効果だけでなく共振器の長い光子寿命による効果が偏光回転角の増大に関わり、光カー信号の増大につながることが分かってきた。これまで提案してきた光スイッチは、直線偏光励起によるキャリア分極によって生じるプローブ光の偏光回転(光カー回転)を利用したものである。これに対して、円偏光励起(σ^+ , σ^-)によるキャリアスピン偏極によって生じるプローブ光の偏光回転(ファラデー回転)を利用した、スピン偏極光スイッチも考えられる。特に、半導体によるスピンによって生じる偏光回転は、光カー回転のような高次の非線形過程(光カー効果)を利用したものではなく、光の吸収飽和による線形な(低次)光学過程によるため、低いパワーによる偏光回転(光スイッチング)が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、半導体多層膜共振器構造に埋め込んだ Er 添加した InAs 量子ドット中の電子スピンを利用した超高速の面型スピン全光超高速スイッチングデバイスを提案し、そ

の基本測定評価を目的とした。特に、1.5 μm 付近の光通信波長帯において電子スピン励起による偏光回転を用いた光スイッチをデモンストレーションし、低い動作パワーでスイッチングが可能であることを示すことを目標とした。

3. 研究の方法

高速な光スイッチングを行うためには、パターン効果低減のため、数 ps 以内に高速キャリア緩和する試料の作製が必須となる。本研究は、まず、① Er 添加 InAs 量子ドットを有する半導体多層膜共振器構造(Er 添加量子ドット共振器)を作製し、その試料構造とキャリア緩和時間の光学評価を行った。スピンによる超高速スイッチングをデモンストレーションするために共振器層内の Er 添加 InAs 量子ドットにおける電子スピンドイナミクスを調べる必要がある。そこで、② 時間分解円偏光ポンププローブ、ファラデー回転測定といった量子ドット中のスピンドイナミクスを観測できる時間分解光学測定系を構築した。③ 最後に作製した Er 添加量子ドット共振器を用いて、実際に偏光回転による光スイッチングを試みた。

以下①の試料作製、②光学測定の詳細について述べる。

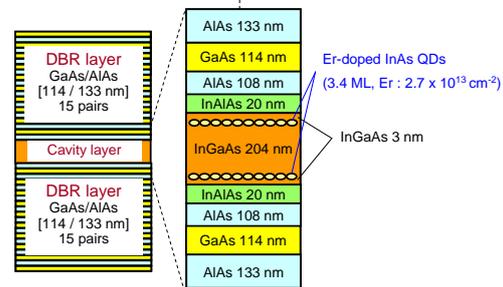


図1. Er 添加した量子ドット共振器構造

① Er 添加量子ドット共振器は、固体ソース分子線エピタキシー法を用いて GaAs (001) 基板上に成長した。15 周期の下部 GaAs/AlAs (111 nm/130 nm) ブラッグ反射多層膜(DBR 膜) を 570°C , 1×10^{-5} Torr の条件で成長した。その後、 480°C に降温し、歪緩和 In_{0.45}Ga_{0.55}As バリア層に埋め込んだ 2 層の自己形成型 Er 添加 InAs 量子ドット(供給量: 3.4 ML) 構造を $\lambda/2$ 共振層として成長した。格子歪緩和は、下部の In_{0.45}Ga_{0.55}As 層(20 nm) で引き起こし、上部の In_{0.45}Ga_{0.55}As は構造の対称性を保つために挿入している。最後に、15 周期の上部 GaAs/AlAs DBR 膜を 480°C と 570°C で成長した。図1に作製した構造を示す。2 層の量子ドット層は、その高光非線形性を共振

器効果で十分高められるように、 $\lambda/2$ 共振器層内の最大電場強度近傍に配置されている。

② スピン偏光回転を観測する時間分解光学測定系の構築は、 $1.5 \mu\text{m}$ 帯で強い吸収を有する 150 層積層 InAs 量子ドットを標準試料として行った。図 2 にその測定系を示す。試料は、繰り返し周波数 80 MHz のチタンサファイアレーザで励起した光パラメトリック発振器 (OPO) から出力される $1.5 \mu\text{m}$ 帯の 100 fs パルスレーザによって励起した。ポンプパルス (3 mW) とプローブパルス ($150 \mu\text{W}$) の遅延時間 (Δt) は、自動ステージによって制御した。円偏光のポンプパルスによって生成された量子ドット中の電子スピンのダイナミクスは、異なる円偏光の透過強度測定 (円偏光時間分解ポンププローブ法) と直線偏光の偏光回転角 (時間分解ファラデー回転法) によって調べた。

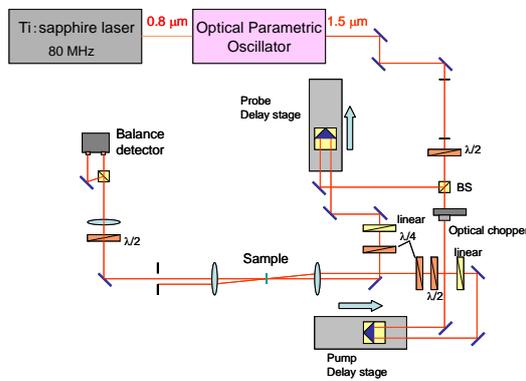


図 2. 時間分解ファラデー回転測定の光学系。

4. 研究成果

実験方法で述べた①から③に対応した結果を以下に示す。

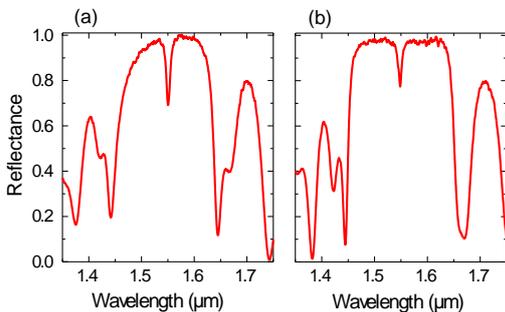


図 3. 上部 DBR 膜を (a) 480°C 、(b) 570°C で作製した Er 添加した量子ドット共振器構造の反射率スペクトル測定結果。

① (光反射率測定) 上部 GaAs/AlAs DBR 膜を 480°C と 570°C で成長した Er 添加したドット共振器の構造評価を、光学反射率測定によって行った。図 3 にそれぞれの試料におけ

る光反射スペクトルを示す。二つの試料で、波長 $1.55 \mu\text{m}$ 付近に共振器モードを観測したが、上部 DBR 膜を 480°C で作製した試料では、ストップバンドの両肩の反射率が低下しており、DBR 膜の品質が良くないことが分かった。一方、 570°C の試料では、ストップバンドの反射率が 100% 近くを維持していた。高温成長によって、高品質な DBR 膜を有する Er 添加した量子ドット共振器構造が作製できることが分かった。

(時間分解透過率変化測定) 図 4 に Er 添加した量子ドット共振器 (570°C 成長) の透過率変化の時間プロファイルを示す。比較のため、何も添加していない量子ドット共振器を同様の条件で測定した結果もプロットし、規格化した。レーザパルスの中心波長は、それぞれの試料の共振器モードに合わせた。これらの共振器では、たった二層の量子ドットしか共振器層に挿入されていないにも関わらず、吸収飽和による透過率変化を明瞭に観測した。また、Er 添加量子ドット共振器の $\Delta t = 0$ での透過率変化 ($\Delta T/T$) は 0.16 であり、これは 20 層積層 Er 添加量子ドットに比べて 2 倍大きかった。これは共鳴量子ドットの高光非線形性が共振器効果によって増大したことを示している。また、Er 添加共振器の時間プロファイルでの半値幅 (FWHM) は 4 ps と何も添加していない量子ドット共振器 (12 ps) に比べて速く、光励起キャリアが高速緩和する結果が得られた。

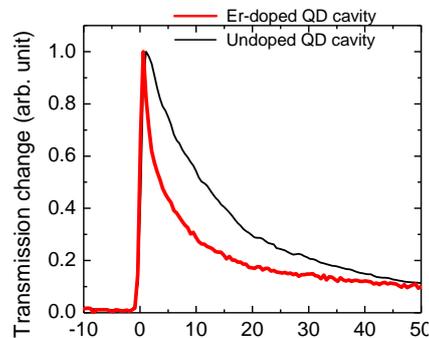


図 4. 上部 DBR 膜を 570°C で作製した Er 添加した量子ドット共振器構造の時間分解透過率変化測定結果 (赤線)。比較のため、何も添加していない量子ドット共振器の結果 (黒線) もプロットした。

② (150 層積層 InAs 量子ドットによる時間分解ファラデー回転測定) 円偏光パルスを照射することにより 150 層 InAs 量子ドット中に電子スピンの形成できる。図 5(a) に右円偏光と左円偏光のプローブパルス (円偏光時間分解ポンププローブ法) によって観測した量子ドット中のスピンドイナミクスを示す。二つの強度差が、スピンの偏極している状態を表しており、数百 ps でスピンの緩和が

ている様子が分かる。図 5(b)に時間分解ファラデー回転法で観測した量子ドット中のスピンドYNAMIXを示す。励起する円偏光を逆にすることで、逆向きのスピンの生成され、図 5(a)と同様に数百 ps でゆっくりとスピンの緩和していることが分かる。

以上の測定から、量子ドット中で光学的に電子スピンを形成することができることを明らかにした。また、時間分解光学測定を駆使することで、スピンによる偏光回転の観測が可能であることを示した。

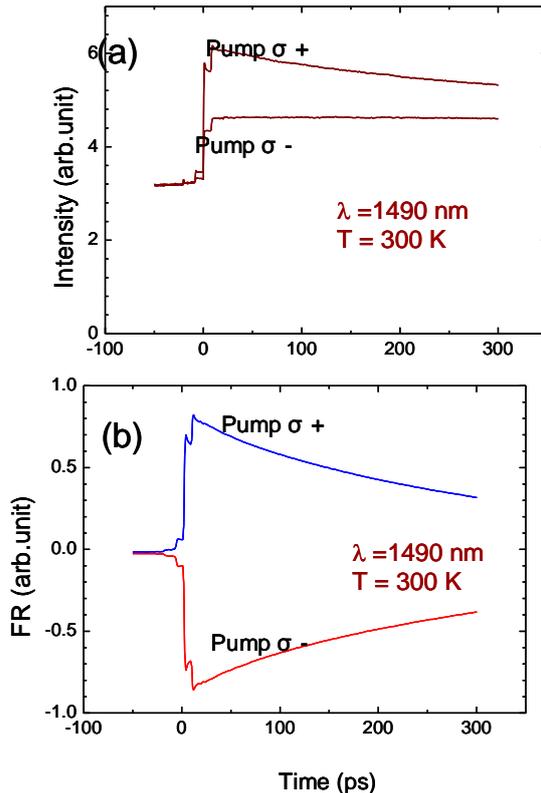


図 5. (a) 150 層積層量子ドットの時間分解円偏光ポンブプローブ測定結果。(b) 時間分解ファラデー回転測定結果。

③ 最後に①で作製した Er 添加した量子ドット共振器によるスピン偏光回転の観測を試みた。まず、円偏光ポンブプローブ法を用い、電子スピンの光学的に形成できるのかを調べた。測定は、励起波長を共振器モード (1550 nm) に合わせて行った。図 6 にその結果を示す。右円偏光、左円偏光でポンブした測定結果の差からスピンは 10 ps 以内で高速緩和することが分かる。この短いスピン緩和時間は、図 4 で得られた短いキャリア緩和時間 (FWHM 4ps) の測定結果からも説明できる。その後、時間分解ファラデー回転測定も行ったが、図 5(b)のように励起偏光を逆にしてもファラデー回転角度が逆向きに回転しない結果が得られた。強い非線形効果によ

って励起光が、試料の中で円偏光が維持できていないことが考えられる。今後、共振器内のスピンを利用した偏光回転を行うためには、共振器内の偏光パルスについて更なるシミュレーションと実験を行う必要がある。

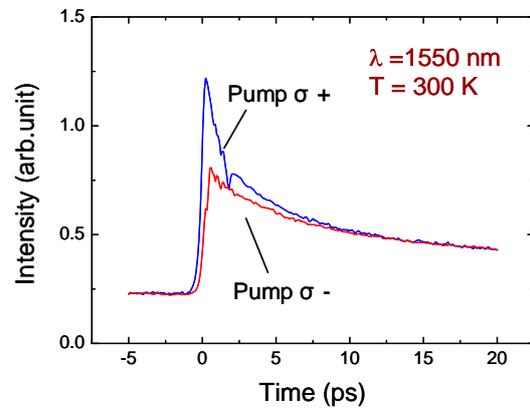


図 6. Er 添加した量子ドットによる時間分解円偏光ポンブプローブ測定結果。

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 H. Ueyama, T. Takahashi, Y. Nakagawa, K. Morita, T. Kitada, and T. Isu, *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** (2012) 査読有, 04DG06.

DOI: 10.1143/JJAP.51.04DG06

② 森田 健 他、歪緩和バリア層に埋め込んだ Er 添加した InAs 量子ドットをもつ多層膜光共振器による超高速全光スイッチ、電気通信学会技報, 111, (2011) 査読なし, 31.

③ K. Morita, T. Takahashi, T. Kitada, T. Isu, “Optical Kerr Signals Markedly Enhanced by Increasing Quality Factor in a GaAs/AlAs Multilayer Cavity”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** (2011) 査読有, 04DG02.

DOI: 10.1143/JJAP.50.04DG02

[学会発表] (計 5 件)

① 上山日向 他、歪緩和バリア層に埋め込んだ InAs 量子ドットを有する GaAs/AlAs 多層膜共振器の四光波混合信号測定、2012 年 3 月 17 日、第 59 回 応用物理学関係連合講演会、早稲田大学 (東京都)

② 上山日向 他、歪緩和バリア層に埋め込んだ Er 添加 InAs 量子ドットを 1 層有する GaAs/AlAs 多層膜共振器の MBE 成長、2012 年 3 月 16 日、第 59 回 応用物理学関係連合講演会、早稲田大学 (東京都)

③ 上山日向 他、歪緩和バリア層に埋め込んだ Er 添加 InAs 量子ドットを有する GaAs/AlAs 多層膜共振器の作製と光学特性、2011 年 9 月 1 日、第 72 回 応用物理学会学術講演会、山形大学（山形県）

④ 森田 健 他、GaAs/AlAs 結合共振器における二つの共振器モードを利用したテラヘルツ帯差周波発生 of 時間領域分光測定、2011 年 8 月 31 日、第 72 回 応用物理学会学術講演会、山形大学（山形県）

⑤ 上山日向 他、歪緩和バリア層に埋め込んだ Er 添加 InAs 量子ドットの作製とその光学特性、2011 年 3 月 25 日、第 58 回 応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学（神奈川県）

〔その他〕

ホームページ等

<http://pub2.db.tokushima-u.ac.jp/ERD/person/147726/profile-ja.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森田 健 (MORITA KEN)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス

研究部・特任講師

研究者番号：30448344

(2) 研究分担者 なし

()

研究者番号：

(3) 連携研究者 なし

()

研究者番号：