

## 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24日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360035

研究課題名（和文）量子ドットを用いた面型多層膜半導体超高速光スイッチの研究

研究課題名（英文）Planar type all-optical switches of semiconductor multilayer using quantum dots

研究代表者

井須 俊郎（ISU TOSHIRO）

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・特任教授

研究者番号：00379546

研究成果の概要（和文）：

InGaAs 格子緩和層内に埋め込んだ InAs 量子ドットを含む GaAs/AlAs 多層膜共振器構造を GaAs 基板上に分子線エピタキシー法により作製し、その非線形光学応答特性を明らかにした。Er ドープにより InAs 量子ドットの超高速キャリア緩和が実現できることを明らかにし、1ピコ秒程度の応答時間の共振器構造において量子ドットを用いることにより2桁以上の大きな非線形光学応答が得られることを検証した。

研究成果の概要（英文）：

We fabricated GaAs/AlAs multilayer cavity structures with InAs quantum dots (QDs) embedded in strain-relaxed InGaAs layers by molecular beam epitaxy on the GaAs substrate, and nonlinear optical responses were investigated. We found that Er-doping induced ultrafast decay of the photo-excited carriers in the InAs QDs, and confirmed that nonlinear optical signals with a response time of around 1ps were obtained in the cavity structure with QDs, which were two order of magnitude larger than that without QDs.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2010年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2011年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学工学基礎・応用光学量子光工学

キーワード：光エレクトロニクス、超高速全光スイッチ

## 1. 研究開始当初の背景

高度情報化社会の構築に向け光通信ネットワークシステムの大容量化が進められ、1テラビット/秒級の超高速光ネットワークにおいては全光システムが望まれており、そのための基盤となるデバイスとして、“全光スイッチ”デバイスの実用化が期待されている。全光スイッチは、材料の非線形光学応答を利用して動作するが、実用化のためには、非線形光学応答の高速性と高効率性を両立させ

ることが極めて重要である。半導体は大きな非線形光学応答を示すが、光吸収により自由キャリアが生成されるとその緩和時間に動作速度が制限され、高速応答が困難になる。一方、光吸収のほとんど無い透明領域の光に対しては、超高速な非線形応答が得られるが、非線形係数が小さく効率が低いという問題点がある。非線形信号増大と応答速度との相反を解決し、超高速でかつ高効率な非線形媒質と素子構造を実現することが課題であっ

た。本研究の代表者らは、周期的多層膜構造によって生じる内部光電場の増大効果を利用することにより、二光子共鳴領域の光に対してピコ秒程度の応答速度では4桁以上の信号増大が生じたことを報告し、実用化に向けたデバイスを目指し、非線形媒質の改善と多層膜構造の適正化を図り、半導体量子ドットと微小共振器構造を用いた面型半導体多層膜光スイッチを提案していたが、実験的な検証はまだなされていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究は半導体多層膜による微小光共振器構造を用いて光パルスの電場強度や時間形状を制御し、超高速かつ大きな非線形光学応答を得ることによって、超高速動作できる面型全光スイッチングデバイスを実現することを目標とし、そのため、以下の点を明らかにすることを目的とした。

(1) ピコ秒オーダーの超高速時間応答に適した半導体多層膜構造を探索し、その光学応答特性を明らかにする。

(2) 分子線エピタキシー法により GaAs 基板上 InGaAs 格子歪緩和層に埋め込んだ InAs 量子ドットのキャリア緩和特性と超高速化のための作製条件を明らかにする。

(3) 量子ドットを埋め込んだ多層膜微小共振器構造のパルス光に対する非線形光学応答の増大効果と応答速度を実験的に明らかにする。

(4) 低入力パワーでの超高速全光スイッチ動作を検証し、実用的な光ファイバー系での動作が可能であることを明らかにする。

## 3. 研究の方法

研究の目的に述べた各項目について以下のように実施した。

(1) 多層膜微小共振器構造の最適化については、伝達マトリックス法による内部光電場のシミュレーションに基づいて、透過スペクトルや、共振器内部電場の空間分布、透過パルスの時間形状、非線形応答信号などを求めた。実験的な半導体薄膜の作製条件の揺らぎ等を考慮し、実現可能な構造を探索し、実用上目標とする1ピコ秒程度の光パルスに対して適した共振器構造を設計した。

(2) 設計された構造を分子線エピタキシャル結晶成長法により作製した。作製した多層膜構造は、反射率スペクトルの測定により、ストップバンド構造と共振器モードのスペクトル幅等から評価した。量子ドットについては、その形状を原子間力顕微鏡により観測するとともに、多層化した試料の吸収スペクトル測定を行い、また、フェムト秒レーザパルスを用いたポンププローブ法による時間分解透過率変化測定によって、キャリア緩和時間の評価を行なった。量子ドットのキャリ

ア緩和時間の超高速化のために、量子ドットへの不純物ドーピングをおこない、その効果を透過率変化測定により調べた。

(3) 全光スイッチ特性の評価検証として、量子ドット層を共振器層に挿入した多層膜微小共振器構造を作製し、その非線形光学応答特性を測定解析した。非線形光学応答特性として、時間分解透過率変化測定とともに、時間分解光カー効果測定を行った。量子ドット層による非線形光学応答信号の増大効果を調べるとともに、動作パワー依存性の評価として入射パルス強度依存性を測定した。また、量子ドットの非線形光学応答特性と、多層膜共振器構造の特性が両立するように作製条件の適正化を図るとともに、構造の適正化を図った。

(4) 低パワー動作の検証のためには、検出信号のパワー依存性の評価とともに、入射光パワーも定量的に評価する必要があり、パルス光を用いた実験においては、入射光パルスと共振器モードのスペクトル幅の整合性を取る必要がある。このため、波長制限光学系を用いてピコ秒応答に適したスペクトル幅のパルスを生成し、それを用いた光学測定系を構築して、非線形光学応答のパワー依存性の測定を行なった。さらに、光ファイバー系での動作検証を実施するための測定評価系の構築をおこなった。

## 4. 研究成果

(1) 半導体多層膜共振器構造の光子寿命はその共振器Q値によって決まるが、Q値は共振器を構成するDBR膜材料の屈折率比や層数に依存する。DBR膜をGaAs/AlAsで構成した $\lambda/2$ 共振器構造の場合には、DBR膜の層数が前後それぞれ十数ペアで、Q値として約1000程度が得られ、その光子寿命はサブピコ秒であり、内部光電場強度は数十倍の増大が生じることがシミュレーション結果から導かれた。実際に分子線エピタキシー法により作製した試料において、その反射率スペクトルを測定し、共振器モードからQ値を求めると、数百程度のQ値が得られており、1ピコ秒程度の光学応答を得る上で、実験的にも十分作製可能な適切な構造であることが分かった。又、光カー信号は、Q値の4乗に比例することが、シミュレーションより明らかとなり、後にも述べるが実験的にも異なる層数のDBRより構成された共振器構造に対する光カー信号測定の結果から示すことができた。さらに、GaAs/AirのDBR構造を使えば、両者の屈折率の比が大きいので、同じQ値でも大きな光電場強度が実現でき、大きな非線形光学応答が見込まれることを明らかにした。

(2) 共振器層の非線形媒質の改善のためのInAs量子ドットについては、ドット作製時の

InAs 供給量と歪緩和 InGaAs バリア層の In 組成について検討し、量子ドットが動作波長の  $1.5\mu\text{m}$  帯で吸収を持ち、大きな吸収飽和による透過率変化が得られるような作製条件を明らかにした。ポンププローブ法による透過率変化の測定から、この歪緩和 InGaAs バリア層に埋め込んだ InAs 量子ドットが、非線形媒質として  $1.5\mu\text{m}$  帯で有効に動作することを確認した。また、そのキャリア緩和時間の超高速化に関して、InGaAs バリア層に埋め込んだ InAs 量子ドットへの Si, Be, Er のドーピングを行い、時間分解透過率変化測定から励起キャリアの緩和特性を調べた。その結果、InAs 量子ドットのキャリア緩和は、非発光過程による数十ピコ秒の緩和時間成分と発光緩和に基づく数百ピコ秒の遅い緩和成分があり、Si  $\delta$  ドーピングにより緩和時間が 8 ピコ秒程度に高速化できること、Be ドーピングにより、遅い緩和成分が抑制出来ることなどを見出した。さらに、Er ドープにより、Si ドーピングを上回る 3 ピコ秒程度の超高速の緩和時間を実現できることを明らかにした。当初、超高速緩和は実現できるものの非線形光学応答が小さくなるという問題点があったが、歪緩和 InGaAs 埋め込み層の組成や、成長条件の改善を図り、ノンドープと同等な非線形性を有し、かつ超高速緩和の InAs 量子ドットを作製できた。図1は20層積層したErドープ InAs 量子ドットの時間分解透過率変化の測定結果を示すもので、3ピコ秒の緩和を示している。

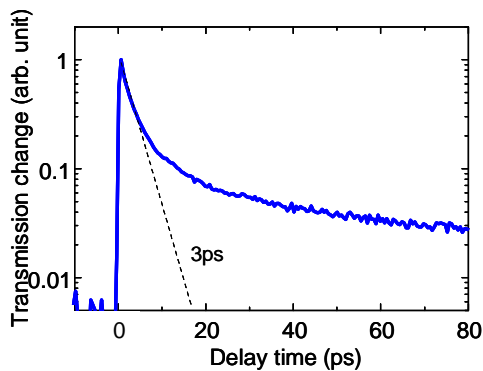


図1. 20層積層した歪緩和 InGaAs 層に埋め込んだ Er ドープ InAs 量子ドットの時間分解透過率変化の測定結果。

(3) 多層膜微小共振器構造の  $\lambda/2$  共振器層に InGaAs バリア層に埋め込んだ InAs 量子ドットを有する共振器構造の非線形光学応答の測定では、まず、ノンドープの InAs 量子ドットを二層含む構造(QD 共振器)と GaAs を  $\lambda/2$  共振器層とした量子ドットを含まない構造(GaAs 共振器)とにおいて光カー効果の信号強度を比較した。図2はその時間応答測定結果を示すもので、わずか2層の量子ドット層を持つ QD 共振器構造において、GaAs 共振

器構造と比較して、60 倍もの大きな光カー信号を得ることが出来た。光カー効果は3次の非線形性による超高速な応答であるので、信号の時間応答は共振器の光子寿命で決められるが、測定結果からも、光子寿命に基づく減衰曲線が得られ、そのことが検証された。

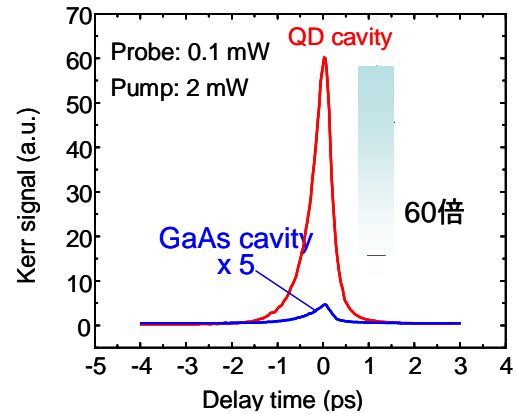


図2. QD 共振器と GaAs 共振器の光カー信号

これらの結果は、歪緩和 InGaAs バリア層に埋め込んだ InAs 量子ドットを用いた微小共振器構造は面型全光スイッチングデバイスとして、ピコ秒オーダーでの超高速動作ができるとともに、低パワー動作が可能であり、さらに、Er ドープの量子ドットを用いることでキャリア緩和時間の高速化によるパターン効果の抑制が期待できることを示しているものである。

以上の成果に基づき、Er ドープ InAs 量子ドットを含む多層膜微小共振器構造の作製と、その非線形光学応答特性の測定評価を実施した。Er ドープの InAs 量子ドットの非線形光学応答の特性改善のために歪緩和埋め込み層の In 組成をノンドープの場合に較べて大きくしていたが、共振器層中に量子ドット層を作製する場合には、同じ作製条件では、多層膜微小共振器構造の共振器特性が劣化するという問題点が生じた。このため、共振器構造の多層膜の結晶成長の成長温度を上げるなどの作製条件の改善をおこなった。その結果、十分な共振器特性を持ち、超高速緩和の量子ドットを有する多層膜微小共振器構造が作製でき、半値幅 4 ピコ秒の超高速応答を示す光カースイッチの動作を検証することができた。しかしながら、量子ドット自身の応答特性と較べて、遅い緩和時間を持つ応答信号の成分が増加しており、応答信号の裾が長く残り、パターン効果の抑制において好ましく無い結果が生じた。これは、量子ドットのキャリア緩和特性が多層膜共振器構造の成長条件に影響を受けて遅い緩和時間を持つ量子ドットが増加していることによると考えられる。この改善のため、多層膜微小共振器構造そのものの再検討を行ない、これまで共振器層全体を歪緩和 InGaAs 層とし

その両端近くに量子ドット層を埋め込んでいた構造を、InAs 量子ドットの周囲だけの極めて薄い歪緩和 InGaAs 層を AsAs 層の中央に埋め込んだ共振器層構造に改良を行った。この構造では、共振器層の成長条件の範囲が広がり、量子ドット特性に影響を与えないような低温成長条件で上部 DBR の作製を行なうことができ、優れた共振器特性の多層膜構造を作製できることがわかった。

これらの結果、わずか1層のErドーパ InAs 量子ドット層を共振器層に有する構造で、低速緩和成分がほぼ皆無な可飽和吸収の超高速応答特性を、これまでの構造とほぼ同等の強度で得ることができた。図3はその共振器構造の時間分解透過率変化の測定結果を示したものである。

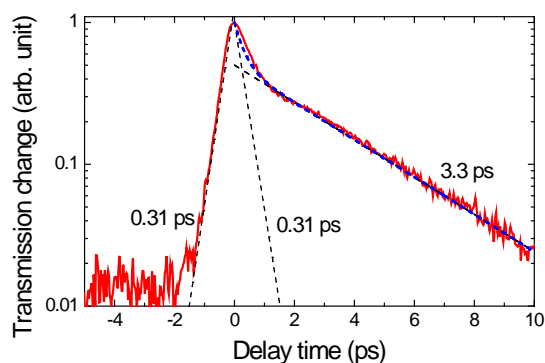


図3. 歪緩和バリア層に埋め込んだ Er ドープ InAs 量子ドットを1層有する GaAs/AlAs 多層膜共振器の時間分解透過率変化

信号の立ち上がり時間は共振器の光子寿命に対応する0.3ピコ秒であり、その減衰はキャリア緩和によるもので、3.3ピコ秒の超高速緩和を実現していることが分かる。さらに遅い緩和を示す成分がほとんど無く、この構造がキャリアの超高速緩和を実現する上で適切な構造であることが分かった。

(4) 非線形光学応答信号の動作パワーの評価に対しては、多層膜微小共振器構造への入力光パルスのパワーを定量化するために、フェムト秒レーザから発する光パルスが持つ広いスペクトルを共振器モードのスペクトル幅に適した入射パルスを生成する必要がある。このため、グレーティングペアとスリットを使った波長制限光学系によって入射光パルスを任意のスペクトル幅に制御できる測定系を構築した。図4は共振器を構成するDBR膜の膜数がそれぞれGaAs/AlAsの26ペア、30ペアである共振器の共振器モードの観測スペクトルと、波長制限光学系により生成した光パルスのスペクトルを示したものである。いずれの共振器に対しても、照射パルス光が有効に共振器内に入射されるため、パワー依存性の定量的評価が可能である。異なるQ値の共振器構造の光カー信号を測定し、シミュレーシ

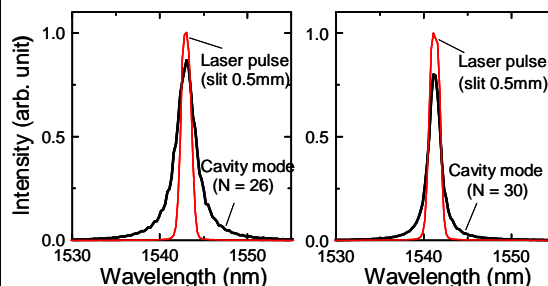


図4. 波長制限光学系により生成した入射光パルスのスペクトルと DBR のペア数が26と30の共振器の共振器モードスペクトル

ョンによって示していたQ値の4乗の依存性を実験的に示すことができた。さらに、2層の量子ドット層を含む共振器層からなる光カー信号測定を行った。その結果、 $6.5 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ の低パワーの制御信号でS/N比18dBで2.0psの超高速光スイッチ信号が得られることを明らかにした。これは、光ファイバー系において用いることのできるパワー密度と同レベルであり、更なる低動作パワー化が必要であるものの、光ファイバー系における実験検証が可能であることを示した。

これらの結果は、ひずみ緩和バリア層に埋め込んだ Er ドープ量子ドットを用いた微小共振器構造が低パワーでピコ秒オーダーでの超高速動作と、さらにパターン効果の抑制ができ、面型全光スイッチング素子として期待できることを明らかにしたものと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計12件)

①Hyuga Ueyama, Tomoya Takahashi, Yoshinori Nakagawa, Ken Morita, Takahiro Kitada, Toshiro Isu, GaAs/AlAs Multilayer Cavity with Er-Doped InAs Quantum Dots Embedded in Strain-Relaxed InGaAs Barriers for Ultrafast All-Optical Switches, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.51, 2012, pp.04 DG06-1~4, DOI:10.1143/JJAP.51.04DG06.

②T. Kitada, T. Takahashi, H. Ueyama, K. Morita, T. Isu, Marked reduction in photocarrier lifetime by erbium doping into self-assembled InAs quantum dots embedded in strain-relaxed InGaAs barriers, Journal of Crystal Growth, 査読有, Vol.323, 2011, pp.241~243, DOI:10.1016/j.jcrysgro.2010.10.120.

③Ken Morita, Tomoya Takahashi, Takahiro Kitada, Toshiro Isu, Optical Kerr Signals Markedly Enhanced by Increasing Quality Factor in a GaAs/AlAs Multilayer Cavity, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.50, 2011, pp. 04DG02-1~4, DOI:10.1143/JJAP.50.04DG02.

④Takahiro Kitada, Akari Mukaijo, Tomoya

Takahashi, Takuya Mukai, Ken Morita, Toshiro Isu, Excitation wavelength dependence of photo-carrier relaxation in Si-doped InAs quantum dots with strain-relaxed InGaAs barriers, *physica status solidi c*, 査読有, Vol.8, 2011, pp.334~336, DOI:10.1002/pssc.201000452.

⑤ Takahiro Kitada, Akari Mukaijo, Tomoya Takahashi, Takuya Mukai, Ken Morita, Toshiro Isu, Doping effect on photocarrier lifetime in InAs quantum dots with strain-relaxed InGaAs barriers grown by molecular beam epitaxy, *Physica E*, 査読有, Vol.42, 2010, pp. 2540~2543, DOI:10.1016/j.physe.2009.11.015.

⑥ Ken Morita, Tomoya Takahashi, Toshiyuki Kanbara, Shinsuke Yano, Takuya Mukai, Takahiro Kitada and Toshiro Isu, Large optical Kerr signal of GaAs/AlAs multilayer cavity with InAs quantum dots embedded in strain-relaxed barriers, *Physica E*, 査読有, Vol.42, 2010, pp. 2505~2508, DOI:10.1016/j.physe.2009.12.035.

⑦ Ken Morita, Nobuyoshi Niki, Takahiro Kitada, Toshiro Isu, Optical anisotropy of two-photon absorption in GaAs/AlGaAs quantum wells measured by photoluminescence, *physica status solidi c*, 査読有, Vol.7, 2010, pp.2482~2485, DOI:10.1002/pssc.200983884.

⑧ Toshiro Isu, Toshiyuki Kanbara, Tomoya Takahashi, Ken Morita, Takahiro Kitada, Optical Kerr signals of GaAs/AlAs multilayer cavities with two-photon resonant quantum wells in the half-wavelength layer, *physica status solidi c*, 査読有, Vol.7, 2010, pp.2478~2481, DOI:10.1002/pssc.200983872.

⑨ Tomoya Takahashi, Takuya Mukai, Ken Morita, Takahiro Kitada, and Toshiro Isu, GaAs/AlAs Multilayer Cavity with InAs Quantum Dots Embedded in Strain-Relaxed Barriers for Planar-Type Optical Kerr Gate Switches, *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol.49, 2010, pp.04DG02-1~5, DOI:10.1143/JJAP.49.04DG02.

⑩ Ken Morita, Tomoya Takahashi, Takahiro Kitada, and Toshiro Isu, Enhanced Optical Kerr Signal of GaAs/AlAs Multilayer Cavity with InAs Quantum Dots Embedded in Strain-Relaxed Barriers, *Applied Physics Express*, 査読有, Vol.2, 2009, pp.082001-1~3, DOI:10.1143/APEX.2.082001.

⑪ K. Morita, T. Kanbara, S.Yano, T. Kitada and T. Isu, Optical Kerr signals of GaAs/AlAs multilayer cavities for a short pulse, *physica status solidi c*, 査読有, Vol.6, 2009, pp. 1420~1423, DOI:10.1002/pssc.200881522.

⑫ Takahiro Kitada, Toshiyuki Kanbara, Shinsuke Yano, Ken Morita, Toshiro Isu, Marked

Enhancement of Optical Kerr Signal in Proportion to the Fourth Power of Quality Factor of a GaAs/AlAs Multilayer Cavity, *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol.48, 2009, pp.080203-1~3, DOI:10.1143/JJAP.48.080203.

[学会発表] (計 26 件)

① 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 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 2012.3.15, 早稲田大学 (東京) .

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 GaAs/AlAs 多層膜光共振器による超高速全光スイッチ, 電子情報通信学会・光エレクトロニクス研究会, 2012.3.2, 機械振興会館 (東京) .

③ 井須俊郎 他, GaAs/AlAs 多層膜結合共振器構造によるテラヘルツ発光素子, レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会(招待講演), 2012.1.31, TKP 仙台カンファレンスセンター (仙台) .

④ Hyuga Ueyama, et al., A GaAs/AlAs multilayer cavity with Er-doped InAs quantum dots embedded in strain-relaxed InGaAs barriers for ultrafast all-optical switches, 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2011.9.28, Aichi Industry & Labor Center (Nagoya) .

⑤ 張ミン他, 超高速光スイッチに向けた GaAs/Air 共振器構造の作製, 2011 年秋季 第 72 回 応用物理学学会学術講演会, 2011.8.29, 山形大学 (山形) .

⑥ 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 年秋季 第 72 回 応用物理学学会学術講演会, 2011.8.29, 山形大学 (山形) .

⑦ H. Ueyama, et al., Optical properties of Er-doped InAs quantum dots embedded in strain-relaxed barriers for an all-optical switch with a multilayer cavity structure, 第 30 回電子材料シンポジウム, 2011.6.29, ラフォーレ琵琶湖 (守山) .

⑧ 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 年春季 第 58 回 応用物理学関係連合講演会, 2011.3.24, 神奈川工科大学 (厚木) .

⑨ Ken Morita, et al., Remarkable Enhancement of Optical Kerr Signal by increasing Quality Factor in a GaAs/AlAs Multilayer Cavity, 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2010.9.22, Univ.Tokyo (Tokyo) .

⑩ 上山日向他, 歪緩和バリア層に埋め込んだ Er 添加 InAs 量子ドットの電気特性, 2010 年秋季 第 71 回 応用物理学学会学術講演会, 2010.9.15, 長崎大学 (長崎) .

- ⑪ Takahiro Kitada, et al., Marked reduction in photocarrier lifetime by erbium doping into self-assembled InAs quantum dots embedded in strain-relaxed InGaAs barriers, 16th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2010), 2010.8.22-27, bcc Berlin Congress Center, Berlin (Germany).
- ⑫ K. Morita, et al., Optical Kerr gate switching in InAs-dot-buried GaAs/AlAs multilayer cavity using a wavelength restricted picosecond laser pulse, 29th Electronic Materials Symposium (EMS-29), 2010.7.14, Laforet Shuzenji (Izu).
- ⑬ Takahiro Kitada, et al., Excitation Wavelength Dependence of Photocarrier Relaxation in Si-Doped InAs Quantum Dots with Strain-Relaxed InGaAs Barriers, The 37th International Symposium on Compound Semiconductors, 2010.5.31, Takamatsu Symbol Tower (Takamatsu).
- ⑭ Ken Morita, et al., Strong optical Kerr gate signal in InAs-dot-buried GaAs/AlAs multilayer cavity using a picosecond laser pulse, The 6th International Conference on Quantum Dots, 2010.4.26, East Midlands Conference Center, Nottingham(UK).
- ⑮ 森田健 他, ピコ秒パルスを用いたInAs量子ドットを有するGaAs/AlAs多層膜共振器構造の光カー信号, 2010年春季第57回応用物理学関係連合講演会, 2010.3.17, 東海大学湘南キャンパス.
- ⑯ 北田貴弘 他, 歪緩和バリア層に埋め込んだEr添加InAs量子ドットにおける高速キャリア緩和, 2010年春季第57回応用物理学関係連合講演会, 2010.3.17, 東海大学湘南キャンパス(平塚市).
- ⑰ 北田貴弘 他, 歪緩和バリア層に埋め込んだEr添加InAs量子ドットにおける高速キャリア緩和, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会 2010年1月研究会, 2010.1.28-29, 京都大学(京都).
- ⑱ Tomoya Takahashi, et al., A GaAs/AlAs multilayer cavity with InAs quantum dots embedded in strain-relaxed barriers for planar-type optical Kerr gate switches, International conference on solid state devices and materials, 2009.10.7, Sendai Kokusai Hotel, (Sendai).
- ⑲ 森田健, 他, InAs量子ドットを有するGaAs/AlAs多層膜共振器における光カー信号の励起光強度依存性, 2009年秋季第70回応用物理学学会学術講演会, 2009.9.10, 富山大学(富山).
- ⑳ 北田貴弘, 他, 歪緩和バリア層に埋め込んだSiドープInAs量子ドットにおけるキャリア緩和の励起波長依存性, 2009年秋季第70回応用物理学学会学術講演会, 2009.9.10, 富山大学(富山).
- ㉑ Ken Morita, et al., Optical anisotropy of two-photon absorption in GaAs/AlGaAs

quantum wells measured by photoluminescence, The 36th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2009), 2009.8.31, University of California Santa Barbara (USA).

㉒ Toshiro Isu, et al., Optical Kerr signals of GaAs/AlAs multilayer cavities with two-photon resonant quantum wells in the half-wavelength layer, The 36th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2009), 2009.8.31, University of California Santa Barbara (USA).

㉓ Tomoya Takahashi, et al., Molecular Beam Epitaxy of InAs Quantum Dots Embedded in Strain-Relaxed InGaAs Layers, Second International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemicoNano2009), 2009.8.11, Annan National College of Technology (Annan).

㉔ Toshiro Isu, et al., Optical Kerr Signals of a GaAs/AlAs Multilayer Cavity with InAs Quantum Dots Embedded in Strain-Relaxed InGaAs Layers, Second International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemicoNano 2009), 2009.8.11, Annan National College of Technology (Annan).

㉕ 高橋朋也他, 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, 応用物理学学会中国四国支部学術講演会, 2009.8.1, 広島大学(東広島).

㉖ K. Morita, et al., Strong optical Kerr signal of GaAs/AlAs multilayer cavity with InAs quantum dots embedded in strain-relaxed barriers, The 14th International on Modulated Conference Semiconductor structures, 2009.7.20, Kobe International Conference Center, Kobe.

[その他]  
ホームページ等

<http://www.frc.tokushima-u.ac.jp/frc-nano/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井須 俊郎 (ISU TOSHIRO)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・特任教授

研究者番号：00379546

### (2) 研究分担者

北田 貴弘 (KITADA TAKAHIRO)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・特任准教授

研究者番号：90283738

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

### (3) 連携研究者

なし ( )