

平成21年6月4日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19360146

研究課題名（和文） 量子ドットナノ構造による広帯域偏波無依存光アンプの実現

研究課題名（英文） Development of Broad-Band Polarization-Independent Optical Amplifier using Quantum Dot Nanostructures

研究代表者

喜多 隆 (KITA TAKASHI)

神戸大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10221186

研究成果の概要：

ナノ形状を制御した独自の量子ドットを利用することにより偏波無依存な光応答を実現し、光通信のボトルネック問題の解消を目指して研究を実施した。本研究では量子ドット形状の縦横比を制御できるコラムナ状の量子ドットに着目した。コラムナ量子ドットは積層数を変化させることで量子ドットの形状(アスペクト比)を自在に制御できるため、発光波長や偏波特性を同時に制御可能である。この独自のアプローチにより光通信帯域発光と偏波無依存動作を同時に実現して、100nmを超える広帯域で多波長に応答する光アンプ特性を初めて実証した。さらにキャビティ構造を有する量子ドットの光スイッチデバイスの試作を行い、超高速光パルスの光再生中継機能を明らかにするとともに、超高速利得飽和応答を利用して30 Gb/s相当の全光スイッチング動作を確認することができた。これを通じて、実用的な超高速光パルス信号再生処理デバイスとしての有効性を明らかにすることができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2008年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
年度			
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：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：量子ドット、光アンプ、偏波無依存、広帯域、光通信

## 1. 研究開始当初の背景

現在、波長多重光通信では Er ドープ・ファイバ増幅器(EDFA)が用いられるが、帯域が狭く(約 30nm)固定されていて波長資源の一部しか使っていないことや、利得の応答時間が数 ms と遅く波長チャンネル数のダイナミックな変動に追従できないなどの欠点があり、次代の光ネットワークではいずれ限界が見えてくる。

われわれのグループでは半導体光アンプによる全光ネットワーク実現を目指して、入力光の偏波に依存せずに超高速応答する量子ドットの実現を目指した研究を行っている。これまでにエピタキシャル成長技術を駆使して柱状量子ドットの作製が可能になり(図 1)、ドットのアスペクト比の最適化(図 2)により偏波無依存な光利得特性を実現できることを明らかにした。これにより異方的に TE 成分が強く増幅される従来の量子井戸半導体光アンプのボトルネック問題を解決した。また、量子ドットを包み込むマトリックス材料組成の最適設計によって波長のチューニングと偏波無依存を同時実現できることが明らかになってきた。

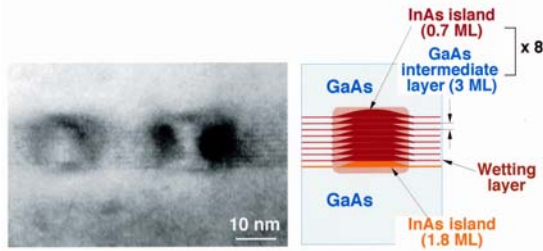


図 1 量子ドットのナノ形状制御

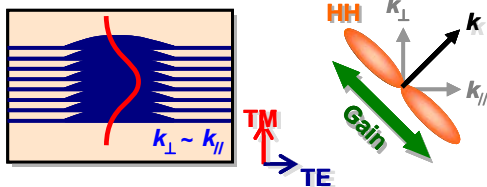


図 2 等形状量子ドット内の波動関数制御と偏波無依存光学応答

## 2. 研究の目的

本研究のポイントは、偏波無依存な量子ドットの応答中心波長を制御する技術確立し、且つそれらを多層積層成長して光通信帯を広くカバーすることであり、これによって広帯域で偏波無依存動作する超高速光パルス信号再生処理デバイス動作を実証することである。しかし、量子ドットの応答光波長、遷移特性、超高速応答特性など多元のパラメータを任意に制御する技術は未完成で、その実現には量子ドットの形状やドットを取り

囲むマトリックス構造も含めた材料設計が不可欠である。本研究では以下に示す 3 つの量子ドット形成技術にフォーカスした研究を推進した：

- 応答中心波長の異なる InAs コラムナ量子ドットの成長し、狙った波長で偏波無依存光応答を実現する。
- InGaAs マトリックス材料組成の制御、歪による応答波長を広帯域化する。
- 超高速キャリア緩和を利用して超高速光パルスに対する光スイッチ特性を明らかにする。

このようにして実現する独自のナノ形状制御量子ドットによって、光利得特性に (1) 偏波無依存光応答と (2) 100nm を超える広帯域応答を同時に実現するこれまでにない新しい機能を生み出すとともに、量子ドット特有の高速利得飽和応答速度を利用して (3) 超高速な光応答を目指す。特に、超高速応答に関しては従来の半導体光アンプでは、“キャリア寿命”で利得飽和の応答速度が決まるために数 Gb/s が速度の限界であったが、量子ドットでは図 4 に示すような“キャリア緩和”で決まる。励起状態からのキャリア緩和は 1ps 未満～数 ps であるため、超高速な光信号処理が期待できる。

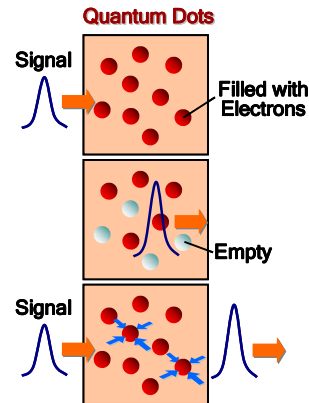


図 3 利得飽和の高速キャリア緩和による回復

## 3. 研究の方法

本研究で用いたコラムナ量子ドット構造を図 1 に示す。まず GaAs(001)基板上に GaAs バッファ層(400nm)、AlGaAs クラッド層(50nm)、GaAs 層 (100nm)の順に成長する。そして InAs 量子ドットを 1.8ML 成長する。その後 GaAs 中間層(3ML)と InAs 層(0.7ML)を交互に成長し密接に量子ドットを積層させる。これにより柱状の量子ドットが形成される。最後に GaAs(50nm)、AlGaAs (50nm)、GaAs (100nm)でキャップしている。コラムナ量子ドットの積層数を変えることによってドットの高さ方向のサイズを制御することが出来る。このようにして作製したコラム

ナ量子ドットの積層数が1~14層の試料において VSL 法を用いて光学利得偏波特性を測定した。VSL 法では励起光をストライプ状に試料表面に照射する。そしてそのストライプ幅を変化させ、試料端面から放射された発光を測定し、発光強度のストライプ幅依存性を調べる方法である。励起光には Ar+ レーザーの 488nm を用い室温で測定を行った。一方、光学利得と共に内部損失についても測定を行った。

一方、高帯域化を実現するために量子ドットの応答中心波長を制御し、且つそれらを多層積層成長した。通常の量子ドットよりも長波長側で発光させるために InGaAs 歪み緩和層を導入した。InGaAs 歪み緩和層を導入するにあたり、InGaAs 層における In 組成比を決定するための試料を作製した。In の組成比が適正でなければ、良質な InAs 量子ドットの成長を行うことができない。本研究では、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  の In 組成比として、InAs 量子ドット成長前に  $x=0.1$  と  $x=0.2$  の  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  buffer 層を導入した試料を作製した。

量子ドットにおける飽和吸収を利用した超高速応答特性を明らかにするために、量子ドットをキャビティ内に挿入し、その光応答を超高速ポンプ・プローブ法により調べた。励起光には 100fs のパルス幅を有する繰り返し 80MHz の Ti: Sapphire レーザを使用し、室温での光スイッチ特性を調べた。

## 4. 研究成果

### 4-1 コラムナ量子ドットを利用した偏波無依存特性

図 4 に VSL 法で測定した結果をまとめる。利得の偏光依存性は積層数によって変化し、8 層前後の積層でほぼ偏光が解消できている結果を得た。そのときの ASE スペクトルは励起準位を含むスペクトル全体にわたって広帯域で偏波異方性が低く抑えられていることがわかる。

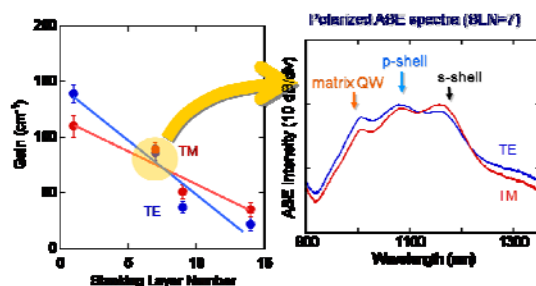


図 4 偏光光学利得特性の積層数依存性と ASE スペクトル

しかし今求めた光学利得は損失も含んだものであり、利得と損失を分けることができない。そこで内部損失 (吸収係数) について

も評価する必要がある。図 3 にその結果をまとめた。内部損失は積層数増加に伴い減少することがわかった。これはコロンナ量子ドットが積層数増加に伴い振動子強度が小さくなる、つまり内部損失が小さくなるためであり、先の利得の変化と矛盾しない。一方、TM モードの大きな伝搬損失を反映して全ての試料において TM モードの内部損失が TE モードのものよりも大きくなった。さらに、利得の方が損失に比べて積層数依存性 (変化の程度) が大きくなることがわかった。このことは、利得においては振動子強度による影響以外にも積層に伴う利得減少の原因が存在することを示唆している。以上の成果によって、SOA デバイス設計にあたっては TM 利得が主となる条件を最適化する必要があることを明らかになった。

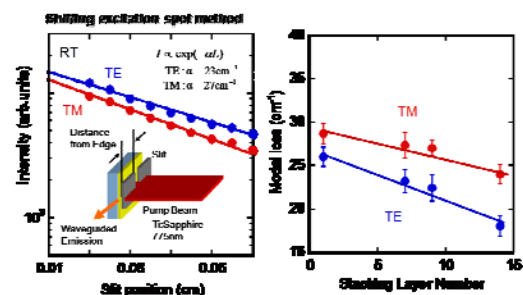


図 5 SES 法で測定した光損失の積層数依存性

### 4-2 量子ドットの積層による広帯域発光デバイスの試作

図 5 に作製した発光ダイオード (LED) の試料構造を示す。基板は n-type GaAs(001) であり、性層をそれぞれ n 型、p 型の活性層で挟みこんだダブルヘテロ構造となっている。活性層には NormalQD、QD/In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As(2nm)、In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As(5nm)/QD/In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As(2nm) の 3 種類の量子ドット層を積層した構造をとっている。積層順は上層のドットによる光の吸収を最小限にするように発光エネルギーが小さい順 (発光波長が長波長側の順) に下から第 1 層目に NormalQD、第 2 層目に QD/In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As(2nm)、第 3 層目に In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As(5nm)/QD/In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As(2nm) としている。

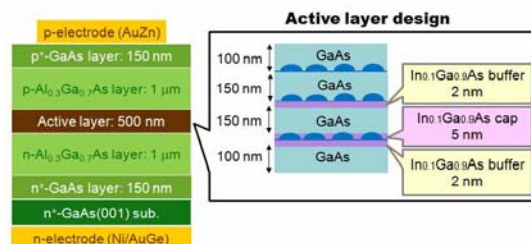


図 6 高帯域積層量子ドット LED 構造

端面 EL 測定系を用いて発光特性を測定した。測定は注入電流の値を 50mA から 1000mA まで変化させ、室温において行った。

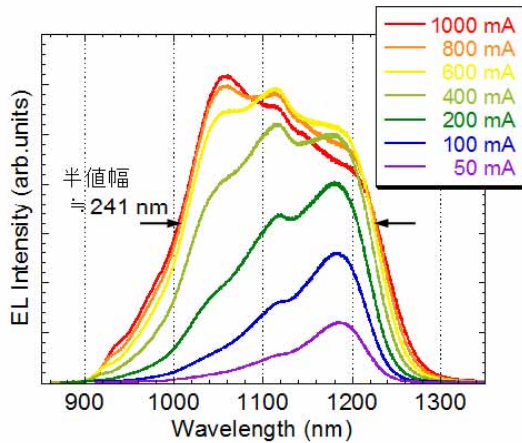


図 7 LED 発光特性の注入電流依存性

図 7 より注入電流 1000mA において発光中心波長 1130nm、半値幅は約 241nm の超広帯域なスペクトルが得られた。このような高帯域発光特性はこれまでに報告がなく、極めて重要な知見である。

#### 4-3 超高速光応答特性

超高速光応答特性は偏波無依存な量子ドット光アンプを光通信応用していく上で重要な特性である。本研究では量子ドットの超高速応答を図るために、利得飽和の高速キャリア緩和を利用したスイッチング特性の実証を試みた。量子ドットはすでに実証してきたようにスペクトルバンド幅の大きな発光・吸収特性を示すためにスイッチで動作する波長を選択する必要がある。そのために本研究では量子ドット活性層の上下にブラッグミラーを成長してキャビティ構造を作製した。量子ドットにおける発光特性とキャビティ構造における波長選択を比較したのが図 8 である。

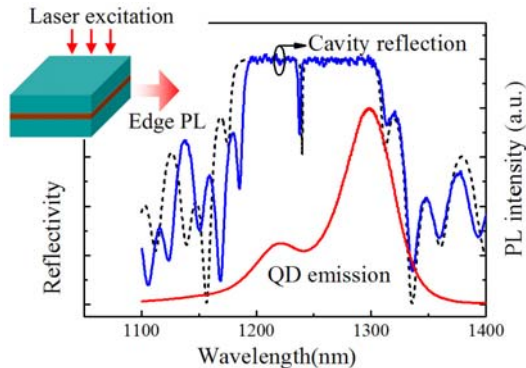


図 8 キャビティ構造による波長選択

青線で示したキャビティ反射スペクトルは 1200~1300nm にストップバンドが現れ

ており、設計どおりの構造ができていると考えられる。一方、ストップバンド中央あたりに見られる急峻なディップが共振波長である。この共振波長の光のみが量子ドットと相互作用できる。つまり、波長選択したことになる。キャビティ構造のサイズを設計して量子ドットの基底状態(GS)と励起状態(ES)を選択して、ポンプ・プローブ法によって計測した結果が図 9 である。利得飽和の超高速状態変化により、反射率が変化していることが分かる。また、励起状態のスイッチング特性では基底状態へのエネルギー緩和も生じるために、基底状態での応答より高速化していることがわかる。32ps は信号処理速度に換算すれば、約 30GHz に相当し、十分高速な光スイッチング性能が得られていると考えている。

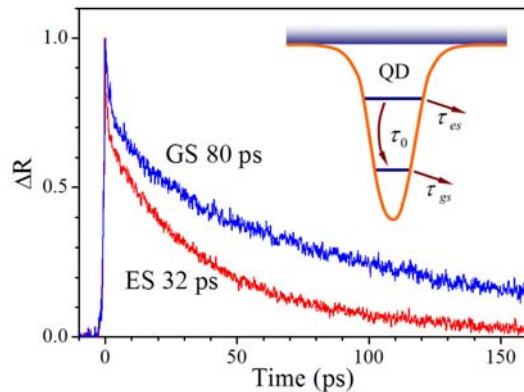


図 9 超高速光応答特性

一方、高帯域化した量子ドットに対応するには、スイッチング波長の連続的な制御が不可欠である。本研究では、スイッチング波長を制御するために光の入射角度を変えることで、約 30nm 程度制御できることを実証した。その結果を図 10 に示す。入射角度を変えることで、波長とともに応答速度も変化しており、40GHz を超えるスイッチング性能を実現できた。

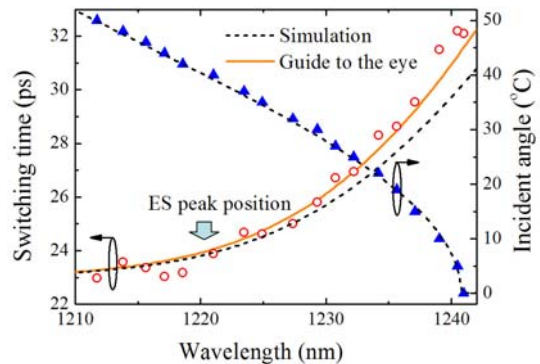


図 10 光入射角度による波長選択

## 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 13 件)

- ①S. Kitayama, T. Kita, M. Kawamura, O. Wada, Y. Chigi, Y. Kasai, T. Nishimoto, H. Tanaka, and M. Kobayashi "Narrowband ultraviolet field-emission device using Gd-doped AlN" (IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering Vol. 1, 012001, 2009) 査読あり
- ②喜多 隆 "原子層窒素ドーパ GaAs を用いた励起子微細構造の制御と光子源に向けた展開" (応用物理, Vol. 78, No. 4, pp. 355-359, 2009) 査読あり
- ③T. Inoue, T. Kita, O. Wada, M. Kamino, T. Yaguchi, and T. Kamino "Electron Tomography of Embedded Semiconductor Quantum Dot" (Appl. Phys. Lett., Vol. 92, 031902, 2008) 査読あり
- ④H. Nakatani, T. Kita, O. Kojima, O. Wada, K. Akahane, and M. Tsuchiya "Photoluminescence Dynamics of Coupled Quantum Dots" (Journal of Luminescence, Vol. 128, pp. 975-977, 2008) 査読あり
- ⑤T. Kita, Y. Harada, and O. Wada "Fine Structure Splitting of Isoelectronic Bound Excitons in Nitrogen-Doped GaAs" (Phys. Rev. B, Vol. 77, 193102, 2008) 査読あり
- ⑥T. Kita, M. Yamada, and O. Wada "Dual Chopped Photoreflectance Spectroscopy for Nondestructive Characterization of Semiconductors and Semiconductor Nanostructures" (Rev. Sci. Instrum., Vol. 79, 046110, 2008) 査読あり
- ⑦O. Kojima, H. Nakatani, T. Kita, O. Wada, K. Akahane, and M. Tsuchiya "Photoluminescence Characteristics of Quantum Dots with Electronic States Interconnected along Growth Direction" (J. Appl. Phys. Vol. 103, 113504, 2008) 査読あり
- ⑧M. Kawamura, Y. Tanaka, T. Kita, O. Wada, H. Nakamura, H. Yanagi, A. Magario, and T. Noguchi "Flexible Field Emission Device Using Carbon Nanofiber Nanocomposite Sheet" (Appl. Phys. Express. Vol. 1, 074004, 2008) 査読あり
- ⑨Y. Harada, T. Kita, O. Wada, H. Ando, H. Mariette "Anisotropic Magneto-Optical Effects in CdTe/CdMnTe Quantum Wire Structure" (Phys. Rev. B, Vol. 78, 073304, 2008). 査読あり
- ⑩T. Kudo, T. Inoue, T. Kita, and O. Wada "Real Time Analysis of Self-Assembled

InAs/GaAs Quantum Dot Growth by Probing Reflection High-Energy Electron Diffraction Chevron Image" (J. Appl. Phys. Vol. 104, 074305, 2008) 査読あり

⑪O. Kojima, A. Miyagawa, T. Kita, O. Wada, and T. Isu "Ultrafast All-Optical Control of Excitons Confined in GaAs Thin Films" (Appl. Phys. Express. Vol. 1, 112401, 2008) 査読あり

⑫T. Inoue, M. Mamizuka, H. Mizuno, O. Kojima, T. Kita, and O. Wada "Effects of indium segregation on optical properties of nitrogen-doped InAs/GaAs quantum dots" (J. Appl. Phys. Vol. 104, 103532, 2008) 査読あり

⑬T. Kita, S. Kitayama, M. Kawamura, O. Wada, Y. Chigi, Y. Kasai, T. Nishimoto, H. Tanaka, and M. Kobayashi "Narrow-band deep-ultraviolet light emitting device using Al<sub>1-x</sub>Gd<sub>x</sub>N" (Appl. Phys. Lett., Vol. 93, 211901, 2008) 査読あり

[学会発表] (計 47 件)

国際会議 (15 件)

①T. Inoue, H. Mizuno, M. Mamizuka, O. Kojima, T. Kita and O. Wada "Tailor-Made Optical Properties of InAs Quantum Dots by Controlling Indium Segregation" (Abstr. International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, Tokyo, April 7-11, 2008)

②O. Kojima, A. Miyagawa, T. Kita, O. Wada, T. Isu "Optical Cancellation of Exciton Population in GaAs Thin Films" (Abstr. 3rd International Laser, Light-Wave and Microwave Conference 2008, Yokohama, April 23-25, 2008)

③Y. Harada, T. Kita, and O. Wada "Exciton Fine Structure of Nitrogen Isoelectronic Center" (Proc. 20th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Paris, May 26-29, 2008)

④O. Kojima, A. Miyagawa, T. Kita, O. Wada, and T. Isu "Optical Control of Residual Excitons for Ultrafast Nonlinear Response in GaAs Thin Films" (Abstr. 8th International Conference on Excitonic Process in Condensed Matter, Kyoto, June 22-27, 2008)

⑤Y. Harada, T. Kita, O. Wada, K. Matsuda, Y. Kanemitsu, H. Ando, and H. Mariette "Near-Field Photoluminescence of Exciton Magnetic Polarons in CdTe/Cd<sub>0.75</sub>Mn<sub>0.25</sub>Te Quantum Wires" (Abstr. 8th International Conference on Excitonic Process in Condensed Matter, Kyoto, June 22-27, 2008)

⑥T. Kita, Y. Harada, and O. Wada "Fine structure of bound excitons in nitrogen-doped GaAs" (Abstr. The 15th International Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter, Lyon, July 7-11, 2008)

⑦Y. Harada, T. Kita, O. Wada, H. Ando, and H. Mariette "Anisotropic Linear Polarization Luminescence in CdTe/CdMnTe Quantum Wires" (Abstr. The 15th International Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter, Lyon, July 7-11, 2008) (Keynote Lecture)

⑧O. Kojima, H. Nakatani, T. Kita, O. Wada, K. Akahane, M. Tsuchiya "Lengthening of Exciton Lifetime owing to Expansion of Electron Envelope Functions in Stacked Quantum Dots" (Abstr. Third International Conference on Optical, Optoelectronic Materials and Applications, Edmonton, July 20-25, 2008) Best Poster Award

⑨S. Watanabe, O. Kojima, T. Kita, O. Wada, and M. Tsuchiya "Transient Response in Negative Time Delay due to Pulse Propagation in GaAs Thin Films" (Abstr. Third International Conference on Optical, Optoelectronic Materials and Applications, Edmonton, July 20-25, 2008)

⑩M. Mamizuka, O. Kojima, T. Inoue, T. Kita, and O. Wada, "Exciton Response Controlled by Introducing a Spacer Layer in Nitrided InAs Quantum Dots" (Abstr. Third International Conference on Optical, Optoelectronic Materials and Applications, Edmonton, July 20-25, 2008)

⑪T. Inoue, H. Mizuno, M. Mamizuka, O. Kojima, T. Kita, O. Wada "Influence of Indium Segregation on Optical Properties in InAs/GaAs Quantum Dots" (Abstr. 15th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Vancouver, Aug. 3-8, 2008)

⑫S. Kido, T. Inoue, T. Kita, O. Wada "Selective Impurity Doping into InAs Quantum Dots by Controlling the Self-Assembled Process" (Abstr. 15th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Vancouver, Aug. 3-8, 2008)

【他 3 件】

#### 国内会議 (32 件)

①T. Inoue, K. Kishimoto, O. Kojima, T. Kita and O. Wada "Growth and Characterization of Double-Stacked InAs Self-Assembled Quantum Dots for Polarization Control of Edge Emission" (Proc. 27th Electronic Materials

Symposium, Shyuzenji, July 9-11, 2008)

②S. Watanabe, O. Kojima, T. Kita, O. Wada, and T. Isu "Propagation effect to exciton-polaritons in GaAs thin films" (Proc. 27th Electronic Materials Symposium, Shyuzenji, July 9-11, 2008)

③喜多隆 "GaAs への希薄窒素添加と局所光応答" (第4回量子ナノ材料セミナー、電気通信大学、2008.7.23) 招待講演

④喜多隆 "GaAs 中窒素束縛励起子微細構造の制御と応用" (第 69 回応用物理学会学術講演会、シンポジウム「窒素添加半導体技術のマイルストーンと新展開」招待講演、2008.9.2-5)

⑤小島磨、中谷浩彰、喜多隆、和田修、赤羽浩一、土屋昌弘 "積層量子ドットにおける励起子発光強度に対する電子間結合効果" (第 69 回応用物理学会学術講演会、4p-ZQ-18、2008.9.2-5)

⑥金潮淵、小島磨、田嶋良幸、喜多隆、和田修、赤羽浩一 "量子ドット埋め込み面型共振器構造を用いた超高速全光スイッチ" (第 56 回応用物理学会関係連合講演会、31p-ZF-1、2009.3.30-4.2)

【他 26 件】

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

喜多 隆 (KITA TAKASHI)  
神戸大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：10221186

##### (2) 研究分担者

和田 修 (WADA OSAMU)  
神戸大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：90335422

小島 磨 (KOJIMA OSAMU)  
神戸大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：00415845

##### (3) 連携研究者

なし