

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：14501

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009年度～2011年度

課題番号：21360151

研究課題名（和文） 積層量子ドットによる動的偏波制御光アンプの実現

研究課題名（英文） Development of dynamically polarization-controlled optical amplifier using stacked quantum dots

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（和文）：

3次元的に構造が制御された量子ドットはデルタ関数的な状態密度を有し、これを利用した特徴あるデバイスの設計が可能である。特に、Stranski-Krastanov型の成長機構を利用して作製したInAs/GaAs自己形成量子ドットは光通信波長帯で動作する半導体レーザーや光中継デバイスには最適であり、偏波制御、広帯域応答、超高速応答を同時に実現すると期待されている。われわれは量子ドットの精密な積層成長技術を開発し、3次元的に閉じ込められた量子ドットから1次元方向の自由度を持つ量子細線に連続的に制御することに成功した。特に、これらの積層量子ドットを内蔵する半導体光アンプ構造を試作し、偏波無依存性の制御特性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Three-dimensionally controlled quantum dot (QD) has a δ -function type density of states, which realizes high-performance devices. In particular, self-assembled InAs/GaAs QDs grown by utilizing the Stranski-Krastanov mode are suitable for laser and optical relay devices and are expected to realize polarization-insensitive operation, broad-band operation, and ultrafast response simultaneously. We developed a precisely controlled stacking technique of InAs/GaAs QDs exhibiting the one-dimensional properties. In particular, we fabricated semiconductor amplifiers including the stacked InAs/GaAs QDs and demonstrated the control of the polarization insensitivity.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2010年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2011年度	2,100,000	630,000	2,730,000
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

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

半導体光アンプ(Semiconductor Optical Amplifier: SOA)は超小型であるだけでなく、100 Gb/s 以上で動作する超高速光パルスの 3R (Reamplification 再増幅, Reshaping 再整形, Retiming 再同期) 光再生中継デバイスやスイッチングデバイスとして期待されている。しかし従来の量子井戸を利用した SOA では量子井戸に平行な偏光成分の増幅利得が圧倒的に大きく、偏光波面が乱れた光ファイバー伝搬光の SOA 出力は入力信号を再生できない。

われわれはこの課題を解決するために独自の柱状量子ドットを利用して TM 利得を増強させて偏波無依存な光応答を実現してきたが、実用で要求されている偏光差分利得は 1 dB 以下と非常に小さく、量子ドットナノ形状のきわめて精密な制御が必要であった。しかし、もし外部制御で動的に偏波特性を 1 dB 以下に収めることができれば、偏波無依存特性を実現するのに必要な結晶成長条件の厳しい制約から解放され、中心波長の選択や光応答速度にかかわる設計の自由度が大幅に向上する。

2. 研究の目的

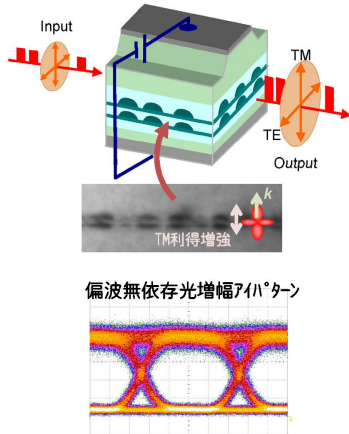


図1 積層量子ドットによる動的偏波制御型光アンプの概念図

本研究では図1に示すような上下に配列した積層量子ドットに着目し、これら量子ドットに局在する波動関数の結合によって TM 利得を増強させ、電場による偏光差分利得の制御を行う新しいタイプの偏波無依存 SOA 構造を提案し、基本デバイス特性を明らかにする。これら一連の成果は、半導体を用いた光中継デバイスの偏波依存問題を完全に解決するだけでなく、量子ドットの特徴である広帯域性と超高速光応答特性を生かした新しく、幅広いデバイス研究を生み出すと考え

ている。

3. 研究の方法

本研究では分子線エピタキシー(MBE)によって GaAs(001)基板に InAs 量子ドットを成長する。量子ドットの成長では下記のようなサイズ制御、組成制御、歪制御に立脚した多面的な結晶成長を実施する。半球状の量子ドットは単体では TE 利得が大きいので、近接した積層成長により上下の量子ドット波動関数を結合させて TM 利得を増強させる。偏波無依存光応答を実現するために量子ドット層で挟まれた中間層の厚さを変えた様々な量子ドットを成長して、構造を最適化した。

本研究では上記のように作製した一連の積層量子ドットに対し基礎光学特性評価を実施し、積層量子ドットから得られる偏光特性を評価した。またこれら実験結果を解析するために、積層量子ドット固有の歪分布の計算と、それに基づいた電子構造の理論計算を実施し、光学遷移選択則の変化と遷移強度を計算し、実験結果と比較した。

さらには、p-i-n 構造における内部電界を考慮した積層量子ドット活性層を設計し、AlGaAs クラッド層で挟み込んだ SOA 素子を試作し、デバイスの基礎特性を精密に評価した。特に、動的変化について印加電圧による変化を詳しく調べた。

4. 研究成果

A. 量子ドットの自己形成

格子定数の不整合な大きな系でヘテロエピタキシャル成長を行うと、成長に伴って歪エネルギーが蓄積して系全体の自由エネルギーを押し上げる。図2のように、格子不整合の程度によってヘテロエピタキシャル成長による自由エネルギーの変化が異なる。非常に大きな格子不整合がある場合、結晶成長すると基板面上に2次元成長し、その後直ちに転位が入り自由エネルギーはそれ以上増加しなくなる。一方、その逆の極端な場合、すなわち格子不整合が小さな場合は十分大きな膜厚の2次元結晶成長が可能である。中間的な歪状態を選択することによって、ある程度の膜厚までは2次元結晶成長を続け、ある膜厚(図中T点)に達すると歪エネルギーが十分にたまり、表面積が増える3次元島状に成長モードを転ずることで表面エネルギーとして過剰エネルギーを分かち。さらに成長膜厚が増すともはや表面エネルギーでは歪エネルギーを吸収しきれなくなり、転位が入る。そしていったんこのように転位が入るともはや島状に成長し続ける

ことによるエネルギーの上昇は損であるので、再び2次元的な結晶成長モードに転ずる。(図中P点)

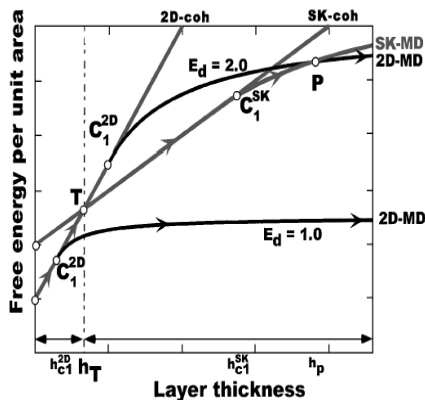


図2 格子不整合系ヘテロエピタキシャル結晶成長における成長モードの転移[K. Okajima, K. Takeda, N. Oyama, E. Ohta, K. Shiraishi, and T. Ohno, Jpn. J. Appl. Phys. 39, 917 (2000).]

B. 量子ドット自己形成過程のその場観察

RHEED 観察は結晶成長その場で表面の微視的な変化を敏感に観測できる点で非常に有効な分析手段である。われわれの分子線エピタキシャル成長 (MBE) では成長面はフェイズダウンの配置で設置しており、成長表面で回折された電子線回折パターンを蛍光板で可視化している。図3に代表的な量子ドット成長中の RHEED パターンを示している。量子ドットが成長すると写真のように量子ドットの島状結晶を貫通した回折点の周辺にシェブロンパターンが現れる。このシェブロンパターンは基板側 (図では上側) で非常に明瞭で、成長方向側 (図では下側) にも弱く現れる。これはそれぞれ電子線の屈折と反射を反映している。

われわれは屈折に起因する明瞭に観測されるシェブロンパターンに注目し、そのシェブロンテールの開き角度 (図中の θ) が InAs の供給量とともにどのように変化するかを精密に調べた。(図4) InAs 成長後しばらくすると約 1.5ML 程度の供給で2次元成長から3次元成長に転移する。さらに成長を続けると、シェブロンテールの開き角 θ が徐々に大きくなることを見出した。その後、約 2.1ML 以降はテール角度が一定となり、約 2.5ML を過ぎたあたりでは再びシェブロンは閉じ始め、それとともに表面が平坦になっていることを示すストリークロッドが中心に現れ始める。このようなシェブロンテールの開き角の変化は成長初期の成長速度の速い高指数面が成長速度の遅い低指数面に置き換わっていく様子を示している。シェブロンテールの開き角が一定になる領域では低指数面で囲まれた量子ドットに高指数面で

囲まれた少し遅れて成長しはじめた量子ドットの成長が追い付き、ドットのサイズが揃いだす。さらに成長を続けると、第2章で述べたように、量子ドットに転位が入り始め、表面は再び平坦化する。図5にその様子を図示している。以上のように量子ドットの成長領域は、(1) nucleation step、(2) assembling step、(3) size-limiting step、(4) dissolving step の4つの領域に分類できる。

量子ドットが自己形成する過程でファセット形成がサイズ均一化に重要な役割を果たしていることが分かった。このファセット構造は形状の異方性の源であり、光学応答に敏感に影響する。われわれは電子線トモグラフィ法を駆使して、GaAs キャップで埋め込んだ量子ドットの3次元構造を明らかにした。図6左は埋め込んだ量子ドットの3次元トモグラフィイメージである。白く見える部分が In 濃度の高い部分で、極薄の InAs ぬれ層上に InAs 量子ドットが形成されている。量子ドットのイメージがぼやけているのは分解能が悪いからではなく、In が析出しているためにややぼやけて見えているのである。頂上付近の高指数面と周辺部の低指数面は観測したイメージを良く再現している。また、量子ドットの頂上付近はキャップ成長中の析出によって In 濃度が低下していることもわかる。

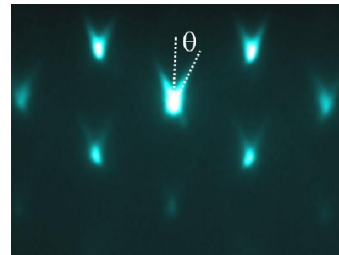


図3 量子ドット成長中の RHEED パターン

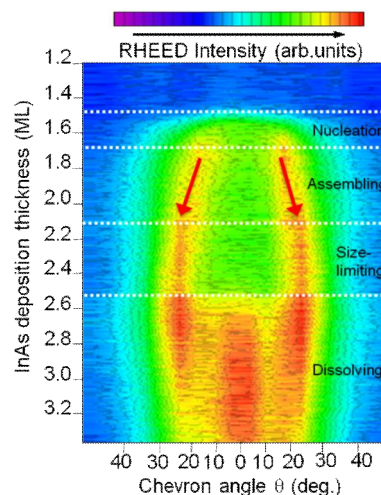


図4 InAs 供給量に伴う RHEED シェブロン構

造の変化

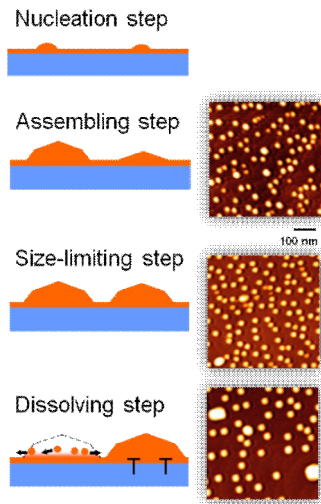


図5 InAs 供給量に伴う量子ドット構造の変化

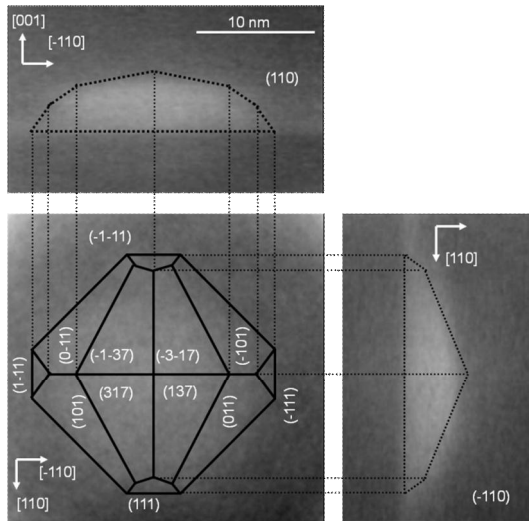


図6 電子線トモグラフィーによる InAs/GaAs 量子ドットの3次元構造イメージングとファセット構造解析

C. 量子ドットの積層成長と偏波無依存デバイス

InAs/GaAs 系量子ドットの光通信デバイスへの応用が非常に期待されていることについてはすでに述べたが、特に光中継デバイスでは信号を受け取り、増幅、タイミング調整、パルス整形をするだけでなく、必要に応じて高速なスイッチや波長変換などを施して出力することが求められる。このためにはデバイス特性の入力偏波に対する依存性をなくさなければならない。通常の導波型デバイスでは量子ドットは扁平であるため量子井戸と同じように TE モードにのみ強く応答する。しかしこれでは光ファイバーを伝搬して偏光がランダムになっている信号に対して等しく応答できない。この課題を解決する

には量子ドットの高さを変える必要がある。量子ドットの高さは積層成長によって調整することができる。このようなアプローチは従来の量子井戸では不可能であり、量子ドットを利用することで初めて解決できる。さらに、量子ドットではドットサイズの不均一分布によってクロストークの無い広帯域な光応答を実現できる。

量子ドットを積層して成長する時、量子ドット層間のスペーサー層が十分薄いと量子ドットは下層のドットの直上に形成される。下層のドットの頂上付近の格子定数は広がり、上層に InAs を成長するとき歪エネルギーを小さくするために下層のドットの頂上付近に凝集しやすくなる。この積層成長を繰り返すと、量子ドットが成長方向にきれいに配列して積層し、積層数によって有効なドットの高さが自在に制御できる。9層積層した量子ドットの透過電子顕微鏡(TEM)写真を図7に示した。積層によって柱状の背の高い量子ドットが作製できた。量子ドットの高さは積層数で自在に変化させることができ、積層量子ドットの偏波特性は、積層数(すなわち量子ドットの高さ)に依存して劇的に変化する。図8に GaAs 中間層厚が3分子層のときのウエファ端面からの発光の偏波特性を示した。積層数の増加に伴って、発光エネルギーは低エネルギー側にシフトし、TM 偏光成分が増加することが分かる。20層を超えると、低エネルギー化は鈍くなり、TM 偏波成分が支配的となる。これはもはや量子ドットではなく、積層方向に励起子が並進運動し、量子細線のように1次元の自由度を得ていることを示している。

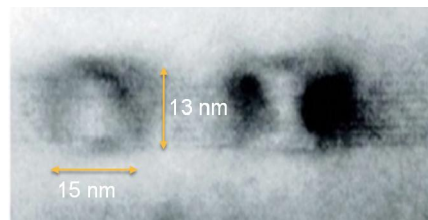


図7 積層量子ドットの TEM イメージ

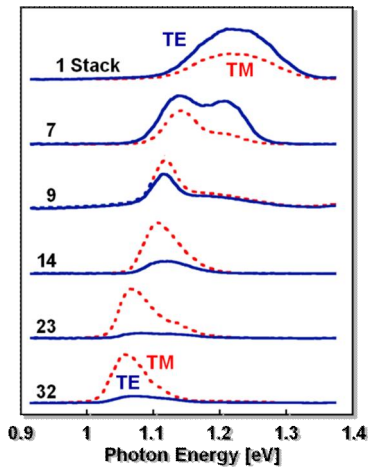


図8 積層量子ドットの端面発光偏光特性

このような量子ドットの積層化による TM 偏波成分の出現のメカニズムを物理的に明らかにするために、われわれは理論計算を実施した。4 バンドの Luttinger-Kohn ハミルトニアンに基づいた多バンド有効質量近似を利用した。図9はその代表的な結果である。量子ドットが積層方向に電子的に結合することによって、偏光特性が劇的に変化することが明らかになった。本理論計算より、偏波が変化するための中心的な機構は価電子バンドにおける重い正孔と軽い正孔がミキシングすることであることが明らかになった。

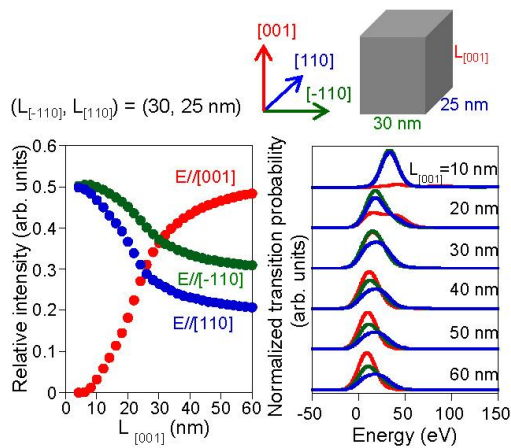


図9 理論計算した積層量子ドット高さによる偏光成分の変化。

本研究ではこのような積層量子ドットを含む半導体光アンプ構造を試作した。AlGaAs/GaAs/AlGaAs 導波路構造を有する光アンプ構造に積層量子ドットを導入した。まず、エレクトロルミネッセンス (EL) における偏波特性を図10に示す。GaAs 中間層厚 4.5nm の積層量子ドットの積層数に対する EL 偏波特性である。積層数を増加させると偏波依存性は無くなり、9 層積層でほぼ偏波差は 1.2dB 程度にまで抑えることに成功

した。この値はデバイスとして目標としている 1dB をほぼ達成している。また、得られた偏波無依存特性は 300nm 以上にわたり実現されており、広帯域偏波無依存デバイスに積層量子ドットが極めて優れていることが明らかになった。

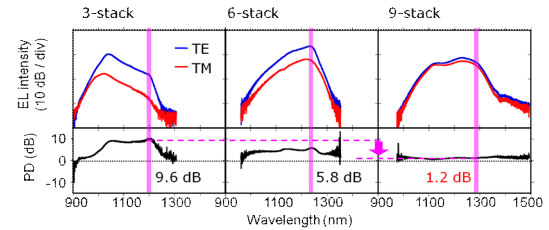


図10 積層量子ドット光アンプデバイス構造の EL 偏波特性

本研究では上で作製した量子ドット光アンプに外部から電界を加えて量子ドット間の電子的結合強度制御した状態で連続的な偏波制御性を調べた。図11にその結果を示す。印加電圧を変えて注入電流が変化すると偏波特性は変化する。特に、上下の量子ドットが結合している、GaAs 中間層が 4.5nm の積層量子ドット (図中央) では劇的に偏波が変化している。このような外部制御による連続的な偏波制御は世界で初めての成果であり、本研究の最大の成果に位置付けている。

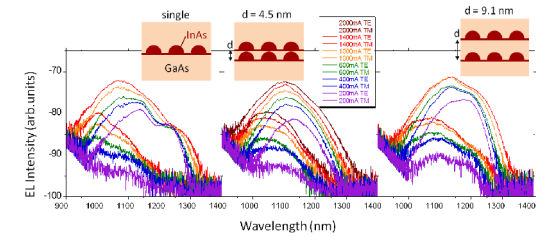


図11 積層量子ドット発光偏光特性の印加電圧 (注入電流) 依存性の積層スペースによる制御

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 10 件) (総計 32 件)

[1] S. Ohta, O. Kojima, T. Kita, and T. Iisu "Observation of Quantum Beat Oscillations and Ultrafast Relaxation of Excitons Confined in GaAs Thin Films by Controlling Probe Laser Pulses" (J. Appl. Phys. Vol. 111, 023505-1~4, 2012)

[2] Y. Harada, T. Kita, K. Matsuda, Y. Kanemitsu, and, H. Mariette "Near-Field Photoluminescence Spectroscopy of CdTe/Cd_{0.75}Mn_{0.25}Te Tilted Superlattices" (Physica Status Solidi C, Vol. 9, No. 2, pp. 262-265, 2012)

[3] W. G. Hu, Y. Harada, A. Hasegawa, T.

- Inoue, O. Kojima, and T. Kita, "Intermediate Band Photovoltaics Based on Interband-intraband Transitions Using In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP Superlattice" (Progress in Photovoltaics: Research and Applications. Vol. 19, Issue8, pp. 1~9, 2011)
- [4] T. Kita, R. Hasegawa, and T. Inoue "Suppression of Nonradiative Recombination Process in Directly Si-doped InAs/GaAs Quantum Dots" (J. Appl. Phys. Vol. 110, 103511-1~4, 2011)
- [5] O. Kojima, N. Tobita, T. Kita, and K. Akahane "Dynamics of Above-Barrier State Excitons in Multi-Stacked Quantum Dots" (J. Appl. Phys. Vol. 110, 093515-1~4, 2011)
- [6] O. Kojima, S. Hamano, T. Kita, and O. Wada "Saturation of Forster Resonance Energy Transfer Between Two Optically Nonlinear Cyanine Dyes of Small Stokes Shift Energies in Polymer Thin Films" (J. Appl. Phys. Vol. 110, 083521-1~5, 2011)
- [7] Y. Harada, T. Kubo, T. Inoue, O. Kojima, and T. Kita "Extremely Uniform Bound Exciton States in Nitrogen δ -doped GaAs Studied by Photoluminescence Spectroscopy in External Magnetic Fields" (J. Appl. Phys. Vol. 110, 083522-1~5, 2011)
- [8] M. Usman, T. Inoue, Y. Harada, G. Klimeck, and T. Kita "Experimental and Atomistic Theoretical Study of Degree of Polarization from Multilayer InAs/GaAs Quantum Dot Stacks" (Phys. Rev. B, Vol. 84, 115321-1~11, 2011)
- [9] T. Yamashita, O. Kojima, T. Kita, and T. Isu "Depolarization Effect on Optical of Exciton States Confined in GaAs Thin Films" (J. Appl. Phys. Vol. 110, 043514-1~5, 2011)
- [10] C. Y. Jin, O. Kojima, T. Kita, O. Wada, and M. Hopkinson "Observation of Phase Shifts in a Vertical Cavity Quantum Dot Switch" (Appl. Phys. Lett. Vol. 98, 231101-1~3, 2011)

[学会発表] (計 10 件) (総計 44 件)

- [1] 喜多隆, "量子ドットを用いた偏波無依存デバイス" (第3回 IPDA 研究会、古河電工健康保健組合 逗子保養所・研修センター、2012.2.2) 招待講演
- [2] 喜多隆, "量子ドットの3次元構造化と電子状態の制御" (徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部フロンティア研究センター日亜寄附講座、徳島大学、2011.12.27) 招待講演
- [3] T. Kita, O. Wada, and H. Harada "Optical Properties of Quantum Dot Superlattices" (Eighth International Conference on Flow Dynamics, Miyagi, November 9-11, 2011)
- [4] 喜多隆, "量子ドットの積層化と電子状態の制御" (CREST シンポジウム、東京大

学武田先端知ビル、2011.10.17-18) 招待講演

- [5] Y. Harada, T. Kubo, T. Inoue, O. Kojima, and T. Kita "Effect of Capping Layer Growth on Bound Exciton Luminescence in Nitrogen δ -Doped GaAs" (2011 International Conference on Solid State Devices and Materials, Aichi, September 28 - 30, 2011)
- [6] 喜多隆, "量子ドットへの選択的不純物添加" (第7回量子ナノ材料セミナー、東京大学先端科学技術研究センター、2011.9.21) 招待講演
- [7] S. Ohta, O. Kojima, T. Kita, and T. Isu "Interaction of Quantized Exciton Polaritons with Nonresonant Pump Pulse in GaAs Thin Films" (12th International Conference on Optics of Excitons in Confined Systems, Paris, September 12 - 16, 2011)
- [8] O. Kojima, T. Kita, and K. Akahane "Photoluminescence Dynamics of Spacer Layer Carriers in Multi Stacked Quantum Dots" (12th International Conference on Optics of Excitons in Confined Systems, Paris, September 12 - 16, 2011)
- [9] T. Kita, T. Inoue, and Y. Harada "Photoluminescence Polarization Anisotropy in Closely Stacked InAs/GaAs Quantum Dots" (Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures, Austria, September 11 - 16, 2011)
- [10] T. Kita "Carrier Dynamics in Quantum Dot Superlattices" (High-Efficiency Materials for Photovoltaics, Imperial College London, August 11, 2011) (Invited Talk)

[その他]

ホームページ等

<http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-photonics/index.html>

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

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