

平成21年6月5日現在

研究種目：基盤研究（A）  
研究期間：2006～2008  
課題番号：18206034  
研究課題名（和文） 超高密度量子ドットによる面型集積高速光変調デバイスの実現  
研究課題名（英文） Vertically integrated ultrafast optical modulation devices using ultrahigh density quantum dots  
研究代表者  
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

研究成果の概要： 量子ドットの形状、サイズ、歪みなどのパラメータを制御できる InAs/GaAs 量子ドット結晶成長方法を開発し、量子ドットの波長、寿命時間、偏光特性などの光学的特性の制御を可能とした。さらに、多層化した量子ドットを分布反射鏡に挟んだ垂直共振器型光変調器構造を実現し、この構造の超高速全光変調デバイスとしての可能性を実証した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	13,400,000	4,020,000	17,420,000
2007年度	12,100,000	3,630,000	15,730,000
2008年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
年度			
年度			
総計	33,200,000	9,960,000	43,160,000

## 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、光スイッチ、ナノ材料、光物性、半導体結晶成長、超高速光通信

## 1. 研究開始当初の背景

量子ドットは、増加が著しい通信情報量に対処するために必須となるテラビット級超大容量、超 100 Gb/s 級の超高速応答特性を含む次世代光デバイスを実現できる材料として注目されている。しかし、研究開始当初において量子ドットデバイスの研究は、通常の平面導波路共振器をもつレーザ、光アンブなど限られたものについてのみなされており、特に超高速光変調器を目指した面型構造光デバイスの研究はほぼ皆無であった。また、このようなデバイス応用に向けて、量子ドットの形状、サイズなどを任意に制御して高密度に量子ドットを形成する結晶成長技術が

必須であるが、当時の技術は制御性において十分な技術は未開発であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、独自のナノ形状制御量子ドット形成技術を用いて光学遷移特性の制御性の実現と量子ドットの高密度化の両面からアプローチすることによって、実用上期待の大きい面型光変調デバイスへの適用可能性を実証することを目的とする。この面型集積光変調器が実現できれば、超高速光信号処理が実現でき、さらにアレイ化も容易となるため信号の時間軸から空間軸への展開を利用した高度な信号処理技術の展開にもつなが

るものと期待される。

### 3. 研究の方法

この目的に向けて、まずMBE法を用いたInAs/GaAs量子ドット結晶成長の機構解明とドット構造の精密評価の研究により、量子ドットの成長において形状その他多元のパラメータを制御することを可能にする。さらにこれらと量子ドットの光学的特性との相関を明らかにすることにより、量子ドット光学特性の制御を可能とする。次にこの量子ドットを面型共振器に作り込んだ光変調器の基本デバイスを試作して特性を評価することにより、超高速光スイッチングデバイスとしての動作可能性を明らかにしていく。

### 4. 研究成果

(1) 本研究では、まずInAs/GaAs量子ドットの結晶成長機構の解明と形成された量子ドットの形状の詳細評価に関する研究を行った。MBE法による量子ドット成長機構のその場観察を行う方法を検討し、通常の量子ドット形成時に見られるRHEEDのシェブロンパターンにおいて、その開き角度にドット形状変化に伴う特有の変化が表れることを発見した。これを用いることにより、濡れ層成長から核形成、ドットファセット面形成と安定化、ドット融解に至る一連の結晶成長過程がその場観察できることが明らかになった。図1にRHEEDシェブロンパターンの開き角度の結晶成長時間依存性を示す。

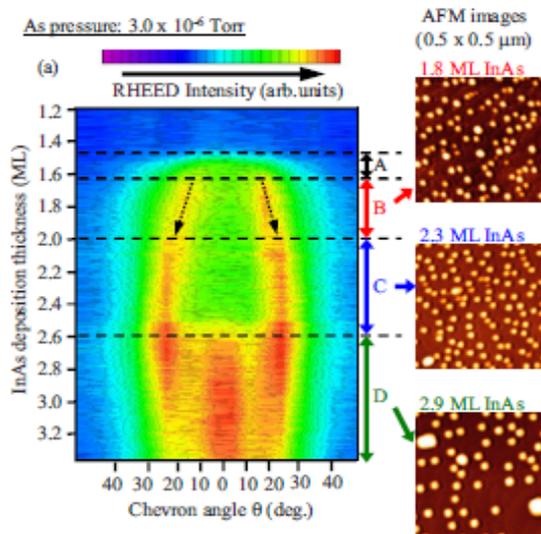


図1 シェブロン開き角度の時間依存性

図中C段階が、低指数面ファセットにより量子ドット形状が自己安定化するタイミングを与える。これらの解析により、ドットファセット面の同定が可能となり、また安定なドット形成のための成長条件が明らかになっ

た。

量子ドットの形状評価については、従来用いていた透過電子顕微鏡(TEM)観察に加えて新しい観測方法であるHAADF-STEM(高角環状検出暗視野走査透過電子顕微鏡)法を適用して、単一量子ドットの形状を評価した。この方法により、通常のTEM像では避けられなかった歪の効果を排除した原子組成構造が直接観測できるようになった。また、この観測方法では単一ドットを有するピラー型微細試料を用いており、極めて広い視野角からの像観察ができることから3次元トモグラフィ像の取得が可能となった。これによって得られた単一量子ドット3次元像の1例を図2に示す。

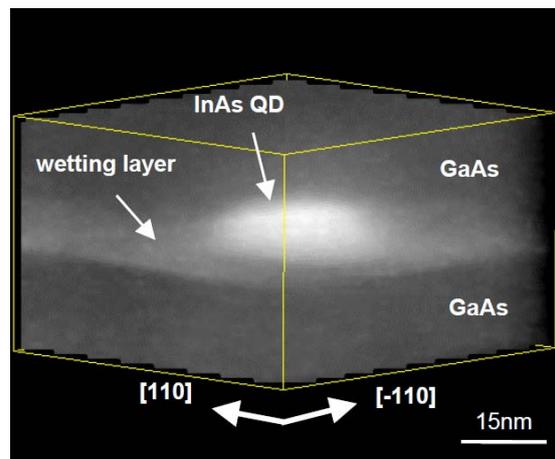


図2. 単一ドットのとモグラフィ像

これによって、上記のファセット面形成モデルの検証、さらに3次元形状における異方性の評価を行うことに成功した。

(2) 量子ドットの光学的特性の評価に関しては、高密度ドットを用いたデバイスにおいて重要となる多層化構造の光学特性に重点を置いて研究した。この検討においては、GaAs基板を用いたInAs量子ドットのみならずInP基板上に形成した多層化InAs量子ドット試料を用いた。これまでの研究で既に、量子ドットを近接積層化したコラーナ量子ドットを含む導波路構造における端面偏光を、ドット高さによって制御でき、TEからTMに至るまでの偏光制御が可能なが分かっている。本研究では、半導体光増幅器(SOA)の偏光無依存化の実現を目指し、形状に加えて歪の影響を含めた検討を継続してより詳細な知見を得た。さらに、結晶製作の観点からさらに安定度が高いと考えられる歪緩和層を導入した多層積層構造において、量子ドット間の垂直方向の距離(スペーサ層厚: d)を変化させて結合の影響を調べた。図3は端面偏光の制御可能性を示す結果

の一例である。図中スペーサ層厚  $d$  の減少により TM 増加が確認されている。

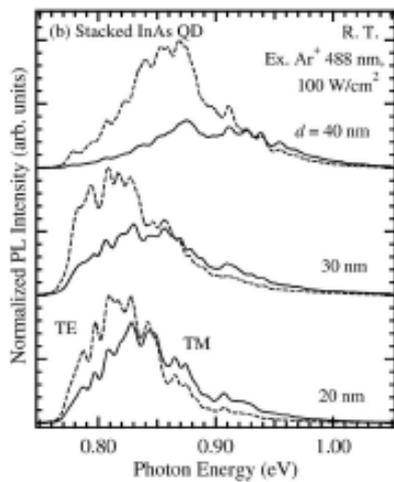


図3.  $d$  の異なる多層構造の端面発光特性

これらの検討により、結合距離の制御によって端面偏光特性が制御できること、これに伴って発光波長、寿命などの特性にも変化がみられること、さらにこれらの変化が量子ドット間の波動関数の結合によるモデルで説明できることを明らかにした。

(3) これらの成果をもとに、量子ドットの面型光変調器への応用を目指して基礎検討を行った。面型デバイスの構造として、非線形媒質である量子ドット層を多層膜 DBR(分布反射鏡)によって挟んだ構造を取り上げた。この構造は、量子ドットの超高速性および高非線形性と垂直共振器構造による非線形性の増強効果を融合させることを狙ったものである。図4にこの構造の概略を示す。2ラムダの厚さの GaAs 層中の電界強度の強い位置に InAs 量子ドットを配置し、上下を GaAs/AlGaAs DBR(上部 10 周期、下部 25 周期)で挟む。

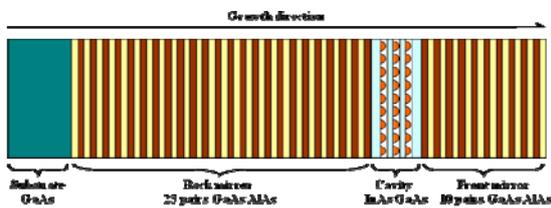


図4. 面型光変調器デバイスの構造

GaAs 基板を用いた試料を作製して、反射スペクトル特性を観測した結果を図5に示す。共振器モードが量子ドット発光波長帯と十分良く一致した試料が得られており、制御光の照射による吸収飽和に伴って共振器モードの反射率が変調できると期待できる。

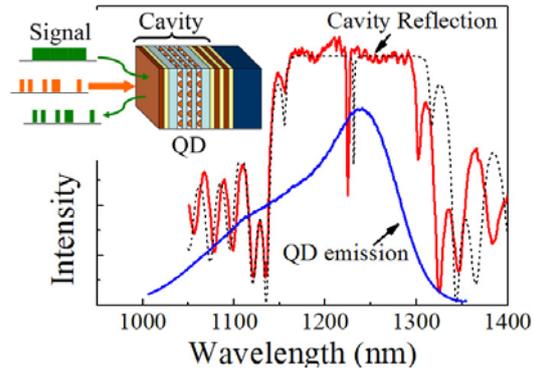


図5. 面型光変調器の反射スペクトル特性

より最近、この試料の光応答特性を評価するためフェムト秒ポンププローブ・システムを用いて検討した結果、最速 23 ps の応答時間をもつ高速光応答を得ることに成功した。これらの結果により、面型光変調器および光スイッチングデバイスとしての基礎特性が実証された。今後、さらなる高速化や出力特性の向上などにより、超高速光信号処理の基本デバイスとして発展していくものと期待している。

#### 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 8 件)

- ① T. 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 (Refereed)
- ② T. 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 (Refereed)
- ③ O. 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 (Refereed)
- ④ H. Nakatani, T. Kita, O. Kojima, O. Wada, K. Akahane, and M. Tsuchiya, "Photoluminescence Dynamics of Coupled Quantum Dots," J. of Luminescence, Vol. 128, pp. 975-977, 2008 (Refereed)
- ⑤ T. 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 (Refereed)

- ⑥ H. Mizuno, T. Inoue, M. Kikuno, T. Kita, O. Wada, H. Mori, and H. Yasuda, "Emission-Wavelength Extension of Nitrided InAs/GaAs Quantum Dots with Different Sizes," J. Cryst. Growth, Vol. 301-302, pp. 709-712, 2007 (Refereed)
- ⑦ T. Kita, T. Inoue, O. Wada, M. Konno, T. Yaguchi, and T. Kamino, "Multidirectional Observation of an Embedded Quantum Dot," Appl. Phys. Lett., Vol. 90, 041911, 2007 (Refereed)
- ⑧ T. Kita, N. Tamura, O. Wada, M. Sugawara, Y. Nakata, H. Ebe, and Y. Arakawa "Artificial Control of Optical Gain Polarization by Stacking Quantum Dot Layers," Appl. Phys. Lett., Vol. 88, 211106, 2006 (Refereed)

[学会発表] (計 45 件)

- ① 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、2009.3.31、つくば
- ② O. 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 受賞)
- ③ T. Inoue, T. Kita, O. Wada, M. Konno, T. Yaguchi, and T. Kamino, "Three-Dimensional Structure of A Single InAs/GaAs Self-Assembled Quantum Dot Observed by Electron Tomography," 34th International Symposium on Compound Semiconductors, Kyoto, October 15-18, 2007
- ④ T. Kudo, T. Inoue, T. Kita and O. Wada, "Real Time Probing of Self-Assembling Process Steps in InAs/GaAs Quantum Dot Growth " Proc. 19th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Matsue, pp. 303-306, May 14-18, 2007
- ⑤ T. Kita, N. Tamura, O. Wada, M. Sugawara, Y. Nakata, H. Ebe, and Y. Arakawa, "Polarization Insensitive Optical Gain of Columnar Quantum Dots," 4th International Conference on Semiconductor Quantum Dots 2006, Chamonix, May 1-5, 2006

[図書] (計 1 件)

- ① O. Wada, Chapter 2, "Femtosecond All-Optical Devices for Ultrafast Communication and Signal Processing," in Chi H. Lee ed., "Microwave Photonics," CRC Press (Boca Raton, FL) 2007, pp. 31-76

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

- ① 「量子ドットの形成方法及び半導体装置の製造方法」喜多隆、木戸聖、笹山憲吾、和田修、安岡奈美、権利者: 富士通株式会社、特許: 特願 2008-200251、2008. 8. 1 (国内)

[その他]

○受賞

- ① 電子情報通信学会 フェロー、和田修 (光信号処理に向けた革新的光デバイスの開発と光ネットワーク応用) 2008 年 9 月
- ② Best Poster Award "Lengthening of Exciton Lifetime owing to Expansion of Electron Envelope Functions in Stacked Quantum Dots" O. Kojima, H. Nakatani, T. Kita, O. Wada, K. Akahane, M. Tsuchiya (Third International Conference on Optical, Optoelectronic Materials and Applications, Edmonton, July 23, 2008)
- ③ 平成 19 年電気関係学会関西支部連合大会 奨励賞、"コラムナ量子ドットによる広帯域発光特性制御" 岸本一正、井上知也、喜多隆、和田修 (電気関係学会関西支部連合大会実行委員会、2008 年 4 月 18 日)
- ④ 応用物理学会講演奨励賞、"InAs/GaAs 量子ドット自己形成過程の RHEED シェブロン構造のその場解析と In 拡散効果", 工藤卓也、井上知也、喜多隆、和田修 (第 68 回応用物理学会学術講演会、6p-E-2、2007.9.6) 2007 年 11 月
- ⑤ IPRM Award, The International Conference on Indium Phosphide and Related Materials(IPRM) 2007, O. Wada (光電子集積技術研究の応用および IPRM 会議組織化への貢献), 2007 年 5 月
- ⑥ 金属学会写真奨励賞、今野充、矢口紀恵、上野武夫、渡部明、喜多隆、井上知也 (日本金属学会、2007 年 3 月 27 日)
- ⑦ 応用物理学会講演奨励賞、"高分解能断面 TEM による埋め込み量子ドット形状のマルチアングル直接観測", 井上知也、喜多隆、和田修、今野充、矢口紀恵、上野武夫 (第 67 回応用物理学会学術講演会、31p-ZF-10、2006.8) 2006 年 11 月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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

赤羽 浩一(AKAHANE KOUICHI)  
情報通信研究機構・第1研究部門・研究員  
研究者番号：50359072

(3) 連携研究者

なし