

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 21 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560412

研究課題名(和文)量子ドットアレイ導波路を用いた広帯域光デバイス開発に関する研究

研究課題名(英文)Broadband optical devices using QDs array waveguides

研究代表者

下村 和彦(Shimomura, Kazuhiko)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：90222041

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：量子ドットコア層によるMOVPE選択成長アレイ導波路を用いた広帯域光デバイス開発に関する研究を行った。広帯域動作を得るために、アレイ導波路および多層構造の発光波長を独立に変化させる構造をダブルキャップ法とバッファ層の歪制御によって行った。層構造を変えた4種類の3層InAs量子ドットアレイ導波路型LED構造を試作し、その発光スペクトルを比較検討した。発光スペクトルの広帯域化のためには3層の発光波長を適切に制御し、同程度の発光強度を得ることが必要であることを示し、発光半値幅500nm以上、フラットトップスペクトルを持つLEDの開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：We have studied broadband optical devices using array waveguide structure of QDs core by selective MOVPE growth. To obtain the broadband operational wavelength range, bandgap energy of each array waveguide and each layer of multi-stacked structure were designed by using double-capping procedure and strain control of buffer layer during the growth of QDs structure. We have fabricated four types 3 layer QDs array waveguide LED, and compared the electro-luminescence spectrum of these devices. To obtain the broadband spectrum, it is necessary to control the peak wavelength shift and the comparable output power of 3 layers. As a result, we have obtained more than 500nm FWHM and flat-topped spectrum of QDs LED.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：量子ドット 広帯域光通信 光デバイス 有機金属気相成長 アレイ導波路

1. 研究開始当初の背景

ブロードバンド加入者数は、2010年3月において3400万を超え、特にFTTH(Fiber to the Home)加入者は全体の半分以上の1770万に達し、急速に進展している。今後のブロードバンドサービスでは、IP電話、放送、インターネット、携帯電話など様々なネットワークサービスが融合することが期待され、そしてこのようなマルチサービスを柔軟に統合する通信ネットワークの発展には、光通信ネットワーク技術は欠くことのできないインフラ技術分野である。なかでもブロードバンドサービスの拡大に伴い、急増するアクセス系のトラフィックを収容し都市内での転送、およびコアネットワークとの橋渡しをするメトロネットワークにおいては、高品質画像・動画配信、大容量データ転送など多様なデータ転送および高速・大容量のネットワークが必要となる。そしてそのための技術として波長多重方式(WDM)が導入され、波長帯域拡充が行われている。現在、Cバンドを中心とした高密度波長多重方式(DWDM)は、Sバンド、Lバンドへとその波長帯域が拡大されようとしているが、それらの波長帯域は1460nm~1625nmの165nmの帯域である。また波長間隔の広い低密度波長多重方式(CDWM)は1410nm~1610nmの200nmの波長帯域を使用している。今後の高速・大容量ネットワークのためには、光ファイバの低損失波長帯を最大限生かした200nmを超える広波長帯域の利用が必要不可欠になると予想される。

これまで我々は有機金属気相成長法による選択成長技術を用いた屈折率分布アレイ導波路に関する研究を行ってきた。これはアレイ導波路の片側に幅広のマスクを配置した非対称アレイマスクを用い、横方向気相拡散とマイグレーション効果により幅広マスクからの位置によりアレイ導波路の成長速度が異なることを利用して、層厚が変化するアレイ導波路を形成するものである。

我々はアレイ導波路コアとして量子ドット構造を用いた選択成長アレイ導波路の試作を行ってきた。非対称アレイマスクを用いた選択成長において、S-K成長モードによる量子ドット成長を行い、さらに量子ドットの高さをダブルキャップ法により層ごとに制御することと量子ドット下部のバッファ層組成を変化して量子ドットの歪制御を行い、3層のInAs量子ドットLED構造においては、電流注入により450nmに及ぶ広帯域な発光半値幅を得ることに成功した。

2. 研究の目的

本研究では量子ドットコア層による選択成長アレイ導波路を用いた広帯域光デバイス開発に関する研究を行うことを目的とする。広帯域光デバイスとしては、広帯域LED、半導体光増幅器、波長スイッチを主として考え、以下の具体的な研究を行う。

広帯域LEDにおいて広帯域動作をするためには、アレイ導波路ごとにまた多層構造において層ごとに発光波長を大きく変化させる構造が必要である。層ごとに発光波長を変える方法としては、ダブルキャップ法とバッファ層の歪制御をこれまで研究してきた。しかし、バッファ層の組成がInP基板との格子整合条件から大きくずれた場合、発光波長は変化するが同時に発光強度が著しく低下するため、GaInAsバッファ層のGa組成は 0.47 ± 0.1 程度に抑えることが必要であることがわかった。これは成長条件の制約によることが大きいので、今後は発光強度を下げることなく、広帯域発光を得るための量子ドット成長条件を検討する。具体的には、バッファ層の成長条件として温度、圧力、V/III流量比、層厚の最適化、またダブルキャップ法での第一キャップ層と第二キャップ層の組成変化による歪制御とその広帯域発光条件の把握を行う。半導体光増幅器は、進行波型の光増幅器を考えているので、数10nm以上の間隔で波長分波された光を一つの導波路で広帯域に光増幅し、その光増幅器をアレイ状に並べて集積し最終的に数100nmの帯域を持つ光増幅器を検討する。

量子ドットアレイ導波路を波長スイッチに応用する場合、屈折率変化が生じる波長帯域がどの程度あるかが重要な指標となる。以前の研究において、量子ドットを電界効果型光スイッチに応用した場合、その動作波長帯域は数10nm程度であることを数値計算によって求めた[K.Shimomura et.al., IEEE JQE, vol. no.2, pp.471-478, 1992]。本研究では、広帯域LEDの量子ドット構造において屈折率変化がどの程度あるかを実験的に測定する。また電流注入による屈折率変化は、量子ドット構造の場合、励起子効果が他の量子構造よりも大きいため、より大きな屈折率変化が得られることが予想される。量子ドット構造と量子井戸構造における屈折率変化量を実際に測定、比較し、広帯域動作可能な光スイッチ・波長スイッチへの応用を検討する。

3. 研究の方法

(平成23年度)

平成23年度は、量子ドットアレイ導波路の成長条件に関する研究と基本的な物性値測定に関する研究を行い、デバイス設計・試作のための土台作りを行った。

量子ドットアレイ導波路は非対称マスクを用いた選択成長を用いてS-K成長モードにより量子ドットを成長した。そして量子ドット高さはダブルキャップ法の第一キャップ層の成長時間を変えることによって制御し、またバッファ層の組成を変化することによって量子ドットの歪量を制御した。GaInAs バッファ層の組成を変化した場合、Ga 組成が 0.47 ± 0.1 を超えると急激に量子ドットの発光効率が低下することが実験的に明らかになっている。バッファ層厚、バッファ層成長時のV/III流量比を最適化することによってGa組成が 0.47 ± 0.1 を超えても発光効率を下げずに広帯域な発光を可能とする量子ドットアレイ導波路の成長条件を把握する実験を行った。さらにこれまでのダブルキャップ法の実験では、キャップ層の組成はInPで行ってきた。量子ドットの歪量を制御するにはキャップ層の組成を変化することも有効である。そこでキャップ層の組成をInPからGaInAsに変更し、広帯域発光を得ることができるGaInAs組成を実験的に確かめた。

(平成24年度)

平成23年度に引き続いて、量子ドットアレイ導波路の成長条件に関する研究を行うとともに、広帯域LED、光増幅器を実現するための多層構造の設計、また量子ドットアレイ導波路に電流注入あるいは電界印加したときの屈折率変化の測定を行い、波長スイッチ設計のための基本的パラメータを把握した。広帯域発光を可能とする量子ドット成長条件について研究を行った。このとき層ごとに量子ドット高さ、バッファ層の歪量を制御した多層構造において、広帯域化のために必要な層数、層ごとの層厚と組成の変化量を、一層のコア層を有した量子ドットアレイ導波路の発光特性を基に設計し、実際に試作を行った。試作した量子ドットアレイ導波路を用いて、LEDを試作し、電流注入発光特性の測定を行った。発光特性としては、電流出力強度、波長特性、発光半値幅の測定を行った。

(平成25年度)

平成23年度、24年度の研究成果を基にして、広帯域光デバイスの試作、量子ドットアレイ導波路LEDの更なる広帯域化を行った。広帯域LEDの試作においては、多層構造量子ドットアレイ導波路と集光導波路の集積化を行った。LEDの場合、アレイ導波路からの広帯域発光をまとめて出力するためには集光構造が必要となるので、発光帯域に応じた集光導波路の設計を行った。波長スイッチング素子として量子ドットアレイ導波路を用いた波長分波機能と導波路スイッチング機能を有する素子の試作を行

うために量子ドット導波路の電気光学特性の測定を行った。波長スイッチ設計のために、量子ドットアレイ導波路のファブリ・ペロ測定により、導波路吸収係数を、また伝搬損失特性より散乱損失等を測定し、それらの結果をマスク設計にフィードバックし、マスクの改良を行った。またファブリ・ペロ測定により電流注入時の屈折率変化を測定した。

4. 研究成果

本研究により、発光半値幅600nm以上、そしてフラットトップなスペクトル形状を持つ広帯域量子ドットLEDを実現した。本報告書ではこの研究成果を中心として説明する。コア層構造の異なる4種類のLEDをそれぞれサンプル1,2,3,4とし、そのELスペクトルと半値幅、各層の発光強度解析について比較する。試作したLEDの層ごとのFCL層厚とGa組成を表1に示す。またサンプル1におけるELスペクトル及び各層の発光強度解析を図1に示す。

表1: 試作したLEDのFCL層厚とGa組成

	サンプル1		サンプル2	
	FCL (nm)	Ga 組成	FCL (nm)	Ga 組成
第3層	4.5	0.38	4.5	0.38
第2層	2.5	0.47	0.5	0.47
第1層	1	0.55	2.5	0.47
	サンプル3		サンプル4	
	FCL (nm)	Ga 組成	FCL (nm)	Ga 組成
第3層	5.5	0.38	8	0.47
第2層	4.5	0.38	5.5	0.47
第1層	2.5	0.47	3	0.47

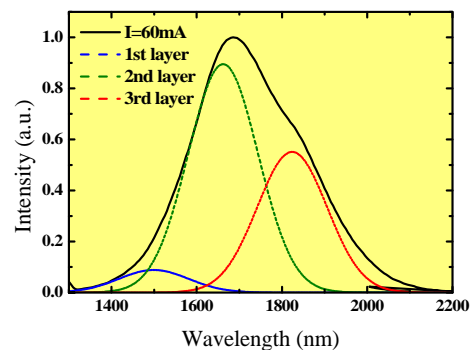


図1: サンプル1のELスペクトル

1層目からFCL層厚は1nm, 2.5nm, 4.5nmとなっており、Ga組成比が0.55, 0.47, 0.38となっている。Ga組成比は発光強度の低下と歪に

よる平坦性の低下を考慮して、格子整合である 0.47 から ± 0.1 以内に制限した。単層での LED 結果と FCL 層厚依存性から算出した各層のピーク波長はそれぞれ 1500nm, 1650nm, 1800nm となっている。EL 測定の結果として注入電流が $I=60\text{mA}$ のとき、半値幅 306nm というデータを得たものの、ガウシアンフィッティングによる解析から一層目の発光が微弱であることが分かった。そこで我々はこの原因を、1500nm 付近で発光する 1 層目への電流注入効率が悪いためだと考え、サンプル 2 として層構造の改善を行った。コア層以外の成長条件は変えていない。発光が微弱であった層を 2 層目に変え、2 層目と 3 層目の歪の影響が大きくなるように FCL 層厚を 0.5nm にし、Ga 組成比を 0.47 としている。各層の予想発光波長は 1 層目から 1650nm, 1500nm, 1800nm となっている。また EL スペクトルと各層の発光強度解析を行ったものを図 2 に示す。

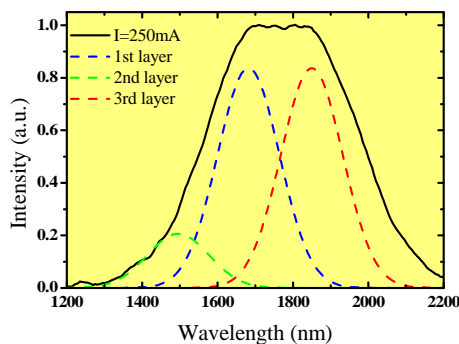


図 2 : サンプル 2 の EL スペクトル

サンプル 2 において、 $I=250\text{mA}$ のときに半値幅 440nm を得ることが出来た。サンプル 1 から 130nm 以上の広帯域化に成功した要因は、1 層目と 3 層目の発光強度が同程度になったことが挙げられる。しかし FCL が薄い層からの発光は弱いままであり、発光強度の低下は層の順番によるものではないという事がわかった。この原因としては FCL を 1nm 以下にすることで、ダブルキャップ法の As/P 交換の際にドットが削られすぎてしまったことなどが考えられる。そこで我々は FCL 層厚を 2.5nm 以上に制限し、1500nm 付近で発光する層の代わりに 1950nm 付近で発光する層を導入し、デバイスを作製した。1 層目から FCL を 2.5nm, 4.5nm, 5.5nm としており、Ga 組成比は 0.47, 0.38, 0.38 とすることで各層の予想発光波長は下から 1650nm, 1800nm, 1950nm となっている。サンプル 2 から比べて、長波化させることで更なる広帯域化を図った。この結果を図 3 に示す。

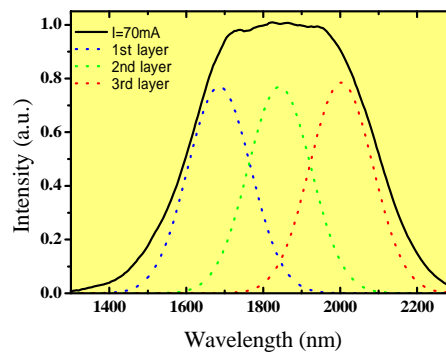


図 3 : サンプル 3 の EL スペクトル

上記のように $I=70\text{mA}$ のときに半値幅 506nm を得た。サンプル 2 と比較すると 66nm の広帯域化に成功しており、これは 1 層目から 3 層目まで各層の発光強度が同程度になったためだと考えられる。さらにサンプル 3 の EL スペクトルはフラットトップな形を得ており、フラットトップ幅をピーク強度から 95% のスペクトル幅、フラットトップ率を $\frac{\text{フラットトップ幅}}{\text{半値幅}}$ と定義することで、サンプル 2 と 3 の EL 特性を比較した。

サンプル 2 では FCL 層厚の薄い 2 層目からの発光強度が、注入電流を大きくしても変わらず低いままとなっている。そのためフラットトップ率は上がり、最大で $I=250\text{mA}$ のときに 40% となっている。サンプル 3 においては注入電流値を大きくしていくと、1 層目からの発光強度も次第に大きくなっていくことで、 $I=70\text{mA}$ で 3 層の発光強度がほとんど同じくらいになり、最大フラットトップ率 53% を得ることが出来た。1 層目の発光強度が次第に大きくなった要因として、注入キャリア量が大きくなったことで、実効的なバンドギャップが大きい 1 層目にもキャリアが閉じ込められるようになったことが考えられる。

次に我々は更なる広帯域化のために各層のピーク波長間隔を大きくすることを考えた。サンプル 3 において各層の予想発光波長は 1 層目から 1650nm, 1800nm, 1950nm であったがサンプル 4 では 1650nm, 1850nm, 2050nm とし、ピーク波長間隔を広げることで広帯域なスペクトルを得られるような構造とした。サンプル 4 の FCL 層厚は 1 層目から 3nm, 5.5nm, 8nm とし、Ga 組成比はすべて 0.47 とした。実際に設計した層構造に比べて、単層の LED と FCL 層厚依存性から算出される予想発光波長が 50nm 程ブルーシフトしているが、これは量子ドットの成長圧力が変わったことが影響している。サンプル 4 の EL スペクトルを図 4 に示す。

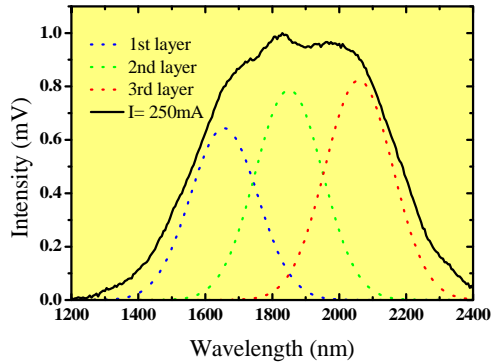


図4：サンプル4のELスペクトル

上記のELスペクトルにおいて、 $I=250\text{mA}$ において半値幅629nmを得ることに成功した。これはサンプル3において1層目から3層目までのピーク波長間隔が300nm程度であったのに対して、サンプル4では400nmまで広げることが出来たと考えられる。

さらにInAs量子ドットを広帯域光スイッチ、波長スイッチに適用するための検討としてInAs量子ドットの屈折率変化、吸収測定を行った。屈折率変化量と吸収係数を測定する方法としてFabry-Perot Etalon法を用いた。測定に用いた量子ドット構造を図5に示す。

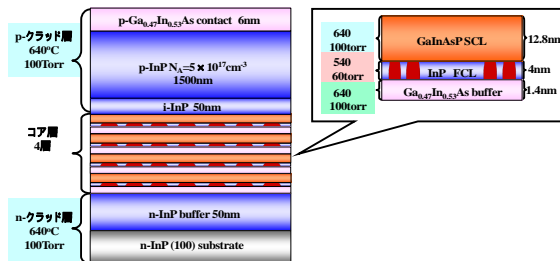


図5：量子ドット導波路構造

この構造に電流を注入した時の屈折率変化を図6に示す。なお、測定した素子の共振器長は $221\mu\text{m}$ である。得られたInAs量子ドット内の屈折率変化と同様に測定したGaInAs/InP多重量子井戸構造30層の屈折率変化を比較した。層数そして導波路構造も異なるため単純に比較することはできないが、低注入電流密度における屈折率変化には明らかに差があり、量子ドット導波路において大きな屈折率変化が得られた。この結果の考察については閉じ込め係数等を詳細に計算し、またどのような物理効果が関連しているかを検討している段階である。

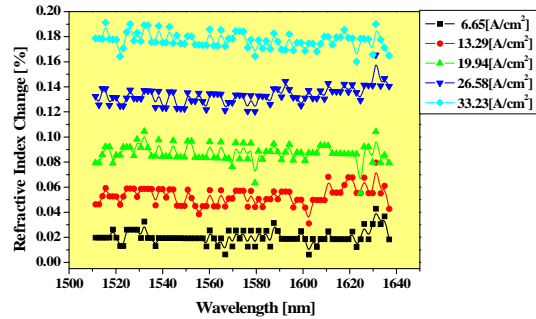


図6：電流注入に伴う屈折率変化

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6 件)

研究成果論文

S. Yoshikawa, M. Yamauchi, Y. Yamamoto, and K. Shimomura, "Current injected spectrum change in flat-topped InAs/InP QDs arrayed waveguide LED with different QD heights", Phys. Status Solidi C, vol.10, no.11, pp.1438-1441, Nov. 2013. (査読有)

S. Yoshikawa, T. Saegusa, Y. Iwane, M. Yamauchi and K. Shimomura, "Flat-topped emission with spectral width above 500 nm from InAs/InP QD waveguide array light-emitting diode", Applied Physics Express, vol.5, 092103, Sept. 2012. (査読有)

S. Yanagi, Y. Murakami, Y. Yamazaki and K. Shimomura, "Switching characteristics in variable index arrayed waveguides using thin film heater", IEICE Trans. Electron., vol.E95-C, no. 7, pp. 1265-1271, July 2012. (査読有)

T. Makino, T. Tanimura, S. Yanagi, and K. Shimomura, "Numerical calculation of wavelength demultiplexed light switching using variable index arrayed waveguide", IEICE Trans. Electron., vol.E95-C, no. 7, pp. 1258-1264, July 2012. (査読有)

Y. Iwane, F. Kawashima, M. Hirooka, T. Saegusa, and K. Shimomura, "InAs/InP QDs grown by selective MOVPE growth using double-cap procedure for broadband LED improved p-cladding layer", Phys. Status Solidi C, vol.9, no.2, pp.210-213, Feb. 2012. (査読有)

F. Kawashima, R. Kobie, Y. Suzuki, and K. Shimomura, "Selective MOVPE growth of InAs QDs using double-cap procedure," J. Crystal Growth, vol.318, pp.1109-1112, 2011. (査読有)

〔学会発表〕(計 14 件)

鋤柄俊樹, 吉川翔平, 山内雅之, 山元雄太, 下村和彦, 「InAs 積層量子ドット LED における各層のピーク波長制御による広帯域化」, 第 61 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学相模原キャンパス, 17p-PA2-3, 平成 26 年 3 月 17 日

吉川翔平, 山内雅之, 山元雄太, 下村和彦, 「InAs 積層量子ドット LED の注入電流に対する各層の発光特性の評価」, 第 74 回応用物理学学術講演会, 同志社大学, 19a-P2-2, 平成 25 年 9 月 19 日

S. Yoshikawa, T. Saegusa, Y. Iwane, M. Yamauchi, and K. Shimomura, "Broadband and flat-topped spectrum of InAs/InP QDs arrayed waveguide LED", 40th International Symposium on Compound Semiconductors, Kobe, Japan, TuC1-6, May 21, 2013.

M. Yamauchi, Y. Iwane, S. Yoshikawa, Y. Yamamoto, and K. Shimomura, "Wide energy level control of InAs QDs using double-capping procedure by MOVPE", 25th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Kobe, Japan, MoPI-5, May 20, 2013.

吉川翔平, 三枝知充, 岩根優人, 山内雅之, 下村和彦, 「選択成長およびダブルキャップ法を用いた InAs 量子ドットアレイ LED のフラットトップスペクトル」, 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学, 29p-B4-9, 平成 25 年 3 月 29 日

三枝知充, 岩根優人, 吉田圭佑, 山内雅之, 吉川翔平, 下村和彦, 「選択成長およびダブルキャップ法を用いた InAs 量子ドットアレイ LED の PL 特性」, 第 73 回応用物理学学術講演会, 愛媛大学, 13a-PA8-4, 平成 24 年 9 月 13 日

吉川翔平, 三枝知充, 岩根優人, 下村和彦, 「MOVPE 選択成長およびダブルキャップ法を用いたアレイ導波路型 InAs 量子ドット LED のスペクトル特性」, 2012 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 富山大学, C-4-26, 平成 24 年 9 月 12 日

Y. Iwane, T. Saegusa, K. Yoshida, M. Yamauchi, S. Yoshikawa, and K. Shimomura, "V/III ratio of Ga_{0.7}In_{0.3}As buffer layer dependence on InAs/InP QDs structure", 16th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, Busan, Korea, WeP049, May 23, 2012.

三枝知充, 岩根優人, 吉田圭佑, 山内雅之, 吉川翔平, 下村和彦, 「3 層 InAs 量子ドットアレイ LED の EL スペクトルの解析」, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, 17p-GP12-5, 平成 24 年 3 月 17 日

K. Shimomura, "Broadband QDs array LED

using selective MOVPE growth," BIT's 1st Annual World Congress of Nano-S&T, Dalian, China, Track 2-2, p.243 (Invited), Oct. 23, 2011.

T. Makino, T. Tanimura, S. Yanagi, and K. Shimomura, "Random switching of wavelength demultiplexed light in variable arrayed waveguide," 16th OptoElectronics and Communications Conference, Kaohsiung, Taiwan 7P3_097, July 7, 2011.

S. Yanagi, Y. Murakami, T. Aoyagi, Y. Yamazaki and K. Shimomura, "Switching characteristics in variable index arrayed waveguides using triangular heater", 16th OptoElectronics and Communications Conference, Kaohsiung, Taiwan 7E2_3, July 7, 2011.

M. Hirooka, F. Kawashima, Y. Iwane, T. Saegusa, and K. Shimomura, "Strain control using GaIn_{1-x}As second cap layer during double-cap procedure in InAs / InP QDs structure", 23rd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Berlin, Germany, P19, May 24, 2011.

Y. Iwane, F. Kawashima, M. Hirooka, T. Saegusa, and K. Shimomura, "InAs/InP QDs grown by selective MOVPE growth using double-cap procedure for broadband LED improved p-cladding layer", 38th International Symposium on Compound Semiconductors, Berlin, Germany, P3.22, May 23, 2011.

〔図書〕(計 1 件)

下村和彦, 「量子ドットエレクトロニクスの最前線」第 2 章第 5 節分担, 株式会社 エヌ・ティー・エス, 2011.

〔その他〕

ホームページ

<http://pweb.cc.sophia.ac.jp/shimolab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下村 和彦 (SHIMOMURA Kazuhiko)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号: 90222041