

機関番号：32621

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20560334

研究課題名 (和文) 光増幅再生機能を有する波長制御型光分岐挿入多重ノードに関する研究

研究課題名 (英文) Reconfigurable optical add/drop multiplexer with a function of optical reamplification, retiming and reshaping

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

研究成果の概要 (和文)：

高速・光増幅再生型光分岐挿入多重ノードを実現するために半導体量子構造内の屈折率変化を利用した波長選択スイッチおよび量子ドット構造を用いた半導体増幅器に関する研究を行った。波長分岐機能と出力ポートスイッチング機能を持つ波長スイッチを試作し、その基本的動作を実証した。また量子ドット構造を有する半導体光増幅器のためにダブルキャップ法を用いた歪制御による多層化構造の実現、さらに量子ドット層厚とバッファ層制御によって 400nm 超帯域を持つ LED を実現し、広帯域半導体増幅器の構造を把握した。

研究成果の概要 (英文)：

Wavelength selective switch using refractive index variation in the QW structure and semiconductor optical amplifier using QDs structure have studied to realize the reconfigurable optical add/drop multiplexer with a function of optical reamplification, retiming and reshaping. We have fabricated the wavelength switch that can demultiplex the wavelength and switch the output port. Fundamental wavelength switching has shown using refractive index change in the QW structure. We have successfully demonstrated the strain control of the QDs using double-cap procedure, and have obtained the QDs LED more than 400nm spectrum width by the control of QDs height and strain of buffer layer.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：光デバイス・光回路

## 1. 研究開始当初の背景

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。そしてそのためには、波長多重技術の導入による帯域拡充に加えて、オン・デマンドサービスに対応するために波長パスの遠隔切替え機能などを実現する柔軟なネットワークの構築、および光信号を電気信号に換えることなく光信号のままスイ

ッチング可能な経済的なスイッチングノードの導入が求められている。

ノードにおいて波長多重信号を分波し波長ごとに受信して電気段で処理をすることはビットレート、フォーマットに対して依存性が生じ、かつ多重化された波長数分の受信機と送信機が必要になり経済的なネットワークの構築が困難になる。そこで光信号のまま方路を切替える機能を有するスイッチングノードの導入が進められている。メトロネットワークでは敷設ファイバを節約すること、および冗長をとるため、入出力ポートがそれぞれ1ポートであるリング構成がとられているが、他にそのノードに信号光を分岐・挿入(アド・ドロップ)する機能を有する光アド・ドロップノード(OADM)が必要となる。この OADM ノードにはパッシブ光コンポーネントを使用し、決められた波長のみを固定的にアド・ドロップする POADM(Passive OADM)とアド・ドロップかパス・スルーかを遠隔から切替えるために波長ごとに光スイッチを使用した ROADM(Reconfigurable OADM)がある。ROADM もアド・ドロップされる波長がポートごとに決まっている ROADM と任意の波長の信号光を任意のドロップポートに分岐する、あるいは任意のアドポートから任意の波長の信号光を挿入することが可能な最も柔軟性の高い ROADM に分類される。この ROADM において中核となるデバイスである波長選択スイッチ(WSS)は、入力ポートから入力された波長多重信号をコリメータでコリメートし、回折格子により分波し、そして分波された信号光は波長ごとに用意された MEMS スイッチにより反射され N ポートのいずれかに出力される、という構成で作製されてきた。また最近では MEMS の代わりに液晶技術や PLC 技術を用いたものも報告されているが、いずれも挿入損失が数 dB であり、またスイッチング速度が数 msec 程度である。今後はパケット交換も見据えてノードにおいても高速な処理が求められ、また波長ごとの伝送速度の高速化に伴い、信号を再生増幅する機能は長距離系だけでなくメトロ系においても重要と考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究は、この最も柔軟性の高い ROADM として、半導体材料をベースにした高速・光増幅再生型 ROADM を MOVPE 選択成長技術と半導体増幅器(SOA)、半導体量子構造内の屈折率変化を利用し実現するものである。従来の MEMS、PLC を用いた波長選択スイッチに対して、半導体材料を用いる利点は、高速なスイッチング速度と光増幅機能である。半導体量子構造への電界印加による超高速

なスイッチングと高速信号を波形整形可能な半導体光増幅器を集積化した波長選択スイッチの実現とこれらを複数集積化した ROADM の実現を目的として、波長選択スイッチ、光増幅器の設計・試作等のデバイス技術と集積化技術の確立と ROADM システムに関する研究を行う。

## 3. 研究の方法

波長選択スイッチは、有機金属気相成長(MOVPE)選択成長技術を用いた屈折率分布アレイ導波路を基本とする。また屈折率分布アレイ導波路をローランド円構造を持つスラブ導波路に配置することによって、通常の導波路長差を持ったアレイ導波路回折格子(AWG)と同様の波長分波機能を持つ。さらに屈折率分布アレイ導波路の屈折率を動的に変化することによって、波長分波機能を保持しつつ出力ポートを動的にスイッチングすることが可能である。本研究では、波長依存性の少ない熱光学効果による屈折率変化を用いた広帯域スイッチングの実証と低消費電力化、また高速スイッチングが可能な電界印加あるいは電流注入による屈折率変化を用いた波長スイッチング素子の試作を行う。さらにこれまで実証してきたスイッチングは、アレイ導波路の屈折率傾斜を変えて、波長分波された信号光の出力ポートを波長の並びを変えずに出力ポートのみをスイッチングするものであったが、分波波長の並びも変え、また出力ポートも変える、ノンブロッキングなランダムスイッチングがこの素子の制御方法によって可能かどうかについても検討を行った。

また半導体光増幅器に関しては、量子ドット構造の検討を行う。量子ドット構造を利用した光増幅器では利得飽和の応答速度が非常に速く、高速な信号光を信号揺らぎを抑えて波形整形することが可能である。この性質を利用し、光増幅・波形整形機能を有する光増幅器を検討する。量子ドット構造の作製は InP 基板上への MOVPE による Stranski-Krastanow モードによる自己組織的な成長を用い、また量子ドットの選択成長技術とダブルキャップ法を用いる。また固定されていない任意の分波波長光を増幅する場合には、信号光波長に対応した光増幅を可能とするために、量子ドットのサイズ、歪等を制御した広帯域な量子ドット導波路が必要となる。そのために量子ドットサイズ等を導波路内において制御できる成長技術の検討を行った。

## 4. 研究成果

有機金属気相成長(MOVPE)選択成長技術を用

いた屈折率分布アレイ導波路を基本とする波長分波器・スイッチング素子の試作を行い、波長分波機能を実証するとともに、熱光学効果、電流注入、電界印加による屈折率変化を用いた出力ポートのスイッチング機能を実現した。

屈折率変化の波長依存性が少ない熱光学効果型波長スイッチング素子では、4 出力ポートでの波長分波とある波長の出力ポートが一巡回する 4 ポートスイッチングを達成した(図 1)。また温度変化を与えるヒーターとして素子全体加熱型とアレイ導波路の一部のみを加熱する薄膜ヒーターを検討した。薄膜ヒーターの形状を三角形状にすることによりアレイ導波路間の屈折率差をより大きくすることによって、全体加熱型に比べて 1/12 以下の低消費電力化を達成した(図 2)。また電流注入、電界印加による屈折率変化を用いた素子においては、1 ポートでのスイッチングを確認した。

屈折率分布アレイ導波路の波長スイッチングの数値計算においては、これまでアレイ導波路とスラブ導波路の結合を考慮していなかったが、ローランド円構造に基づいたスラブ導波路における光の回折も考慮した波長分波特性、巡回的なスイッチング特性、およびランダムなスイッチング特性の数値解析を行った。導波路アレイ数 16 本、導波路間隔  $6\ \mu\text{m}$ 、導波路長  $10000\ \mu\text{m}$ 、アレイ両端屈折率差=1.35%の計算モデルにおいて、アレイ導波路からの出射光のモード分布は考えず、屈折率分布に応じた位相差と、ローランド円構造によるアレイ導波路と出射ポート間の距離に基づく回折積分を用いて計算を行った。このモデル構造にて解析を行った結果、入力波長  $1.57\sim 1.63\ \mu\text{m}$  において、4 つの出力ポートから分波間隔約  $20\text{nm}$  の波長分波特性が得られた。さらにこの 4 つの分波波長において、アレイ導波路部分に任意の屈折率変化を与えて、4 つの出力ポートにおけるスイッチング特性を計算した。アレイ導波路  $10000\ \mu\text{m}$  に最小で  $-0.149\%$ 、最大で  $0.068\%$  の、階段型ではなく不規則な屈折率変化を与えることによって 4 分波波長を 4 出力ポートに分波特性を保持しながら、24 通りのスイッチングをする計算結果を得ることが出来た。スイッチングクロストークは  $-5\sim -25\text{dB}$  程度であった。これにより屈折率分布アレイ導波路の屈折率制御によって波長選択スイッチを実現することが可能であることを示した。

図 1 : 各波長における出射ポートの近視野像

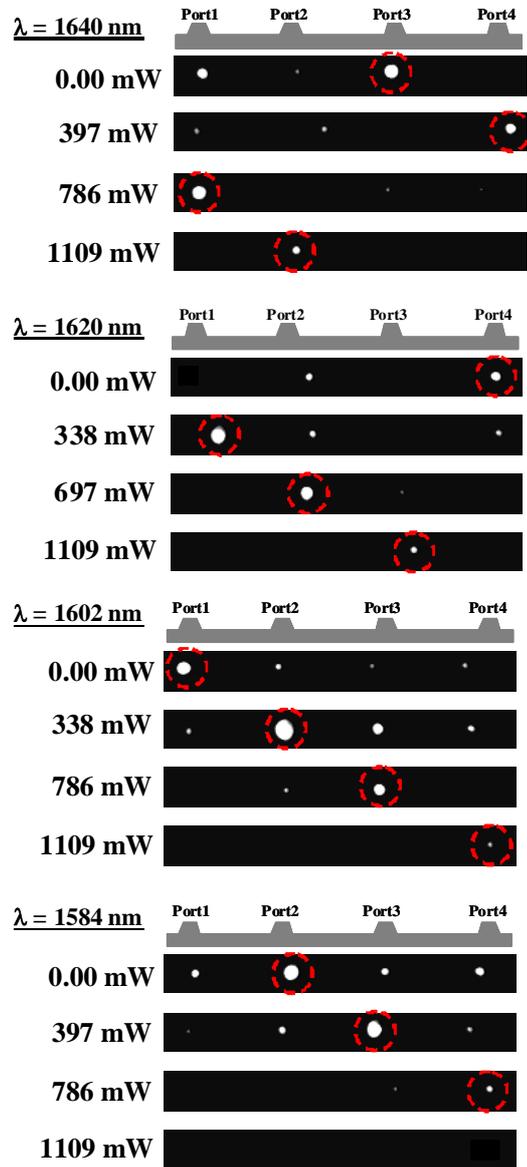
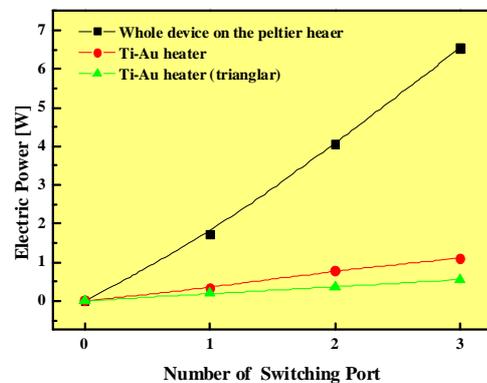


図 2 : ヒータ形状による消費電力の変化  
量子ドット構造を用いた光増幅器の検討として、選択成長とダブルキャップ法を用いた量子ドット層の成長を行い、歪制御による多層化の検討、またアレイ導波路と量子ドット層厚および歪制御を用いた広帯域化の検討



を行った。  
 光増幅器の高飽和特性のためには量子ドット層の多層化が必要となる。InAs 量子ドットは InP 基板と約 3%の圧縮歪を持つため、多層化のためには引張歪を持つ層の導入が必要となる。本研究では、ダブルキャップ法でセカンドキャップ層(SCL)に Ga 組成を変化した GaInAs 層を用いて歪制御を行った。ダブルキャップ法は As-P 交換によりファーストキャップ層(FCL)厚より飛び出した量子ドットを削る方法であり、これにより量子ドット層厚の均一化とその上のSCLにより歪制御を行うことができる。図 3 は Ga 組成を変化した SCL による量子ドットからのフォトルミネッセンスである。SCL を Ga<sub>0.51</sub>In<sub>0.49</sub>As に変更することでドット層の歪みを緩和し、発光強度・半値幅は格子整合の Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As に比べて改善した。表面の量子ドットの横方向サイズばらつきと密度を AFM 測定により観測した結果では、格子整合の Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As に対し歪みの緩和を行った Ga<sub>0.51</sub>In<sub>0.49</sub>As では、ばらつきは約 28%から 22%に低減し、ドット密度は 1.71E10/cm<sup>2</sup> から 1.97E10/cm<sup>2</sup> に増加していることを観測し、Ga 組成 0.51 の SCL を用いることによって歪緩和し、量子ドットの多層化構造が可能であることを実証した。

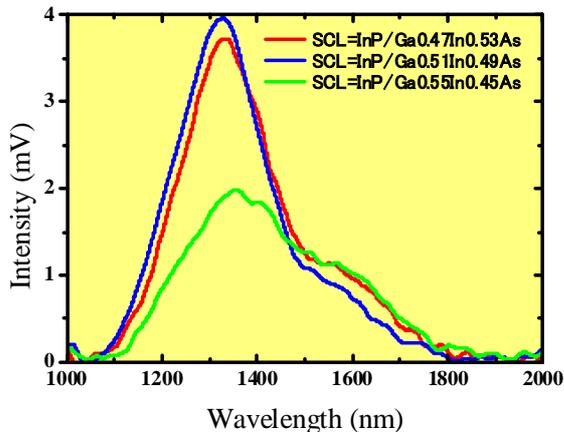


図 3 : Ga 組成変化 SCL を用いた量子ドットの PL 特性

光増幅器の広帯域化のために、量子ドットアレイ導波路の発光特性について検討を行った。まずアレイ導波路パターンによる選択成長技術を量子ドットに応用し、量子ドットアレイ導波路を試作した。通常の S-K モード量子ドットにおいてはアレイ導波路間の PL 発光波長に大きな差がないが、ダブルキャップ法を用いることによりアレイ導波路間の差が得られることを見出した。ダブルキャップ法による量子ドット層厚の均一化と選択成長による FCL の層厚差が有効であったと考えられる。そして広帯域化のために、層方向に

において FCL の層厚を変化して量子ドット層厚を変えた多層構造、また量子ドット下部のバッファ層の組成を変化して量子ドットへの歪を制御した構造を検討した。試作した 3 層量子ドットのコア構造を図 4 に示す。FCL は 1.5nm、3nm、4.5nm に、また GaInAs バッファ層の Ga 組成は 0.30、0.47、0.70 に変化させている。これにより各量子ドット層からの発光波長が変化し、また選択成長アレイ導波路構造によりアレイごとの FCL、Ga 組成が変化し、全体として広帯域化が可能となる。この量子ドットコア層を導入した LED 素子の電流注入による発光特性を図 5 に示す。最大で発光半値幅 435nm が得られた。この構造を光増幅器に応用することによって S, C, L バンドを含む 1300nm~1700nm 帯をカバーする超広帯域化の可能性を示すことができた。

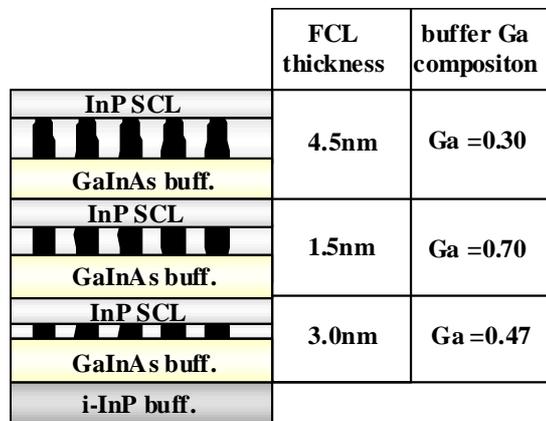


図 4 : 3 層量子ドットのコア構造

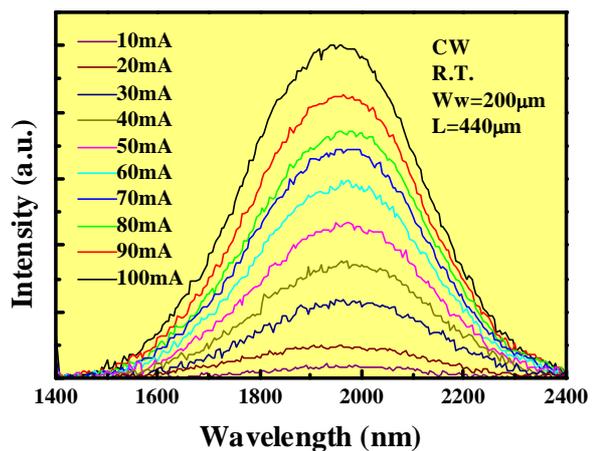


図 5 : 3 層量子ドットの EL 発光特性

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

1. 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
2. Y. Saito, T. Okawa, M. Akaishi, and K. Shimomura, "Wideband wavelength electroluminescence from InAs/InP QDs using double-cap procedure by MOVPE selective area growth", J. Crystal Growth, vol.310, issue 23, pp.5073-5076, Nov. 2008. 査読有
  3. M. Akaishi, T. Okawa, Y. Saito, and K. Shimomura, "InAs/InP QDs with GaIn1-xAs cap layer by a double-cap procedure using MOVPE selective area growth", J. Crystal Growth, vol.310, issue 23, pp.5069-5072, Nov. 2008. 査読有
  4. M. Akaishi, T. Okawa, Y. Saito and K. Shimomura, "Wide emission wavelength InAs/InP quantum dots grown by double-capped procedure using MOVPE selective area growth", IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, vol.14, no.4, pp.1197-1203, Aug. 2008. 査読有
  5. Y. Shimizu, S. Kawabe, H. Iwasaki, T. Sugio, and K. Shimomura, "Wavelength switching using GaInAs/InP MQW variable refractive-index arrayed waveguides by thermo-optic effect", IEICE Trans. Electron., vol.E91-C, no.7, pp.1110-1116, July 2008. 査読有

[学会発表] (計 35 件)

1. F. Kawashima, R. Kobie, Y. Suzuki, and K. Shimomura, "Selective MOVPE growth of InAs QDs using double-cap procedure," The 16th International Conference on Crystal Growth (ICCG-16), Beijing, China, HJ1 (Invited), Aug. 2010.
2. Y. Murakami, T. Sugio, T. Tanimura, T. Makino, and K. Shimomura, "Wavelength switching in variable index arrayed waveguides using Ti/Au thin film heater", 15th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2010), Sapporo, Japan 8E1-5, July 2010.
3. T. Tanimura, T. Sugio, Y. Murakami, T. Aoyagi, and K. Shimomura, "Numerical calculation of wavelength switching in index-varied array waveguide", 15th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2010),

- Sapporo, Japan 7P-64, July 2010.
4. T. Sugio, T. Aoyagi, T. Tanimura, Y. Murakami and K. Shimomura, "Switching characteristics in variable refractive-index waveguide array by carrier injection", 22nd Indium Phosphide and Related Materials conference (IPRM 2010), Takamatsu, Japan, WeP21, June 2010.
  5. K. Shimomura, Y. Suzuki, Y. Saito, and F. Kawashima, "InAs/InP QDs broadband LED using selective MOVPE growth and double-cap procedure," 22nd Indium Phosphide and Related Materials conference (IPRM 2010), Takamatsu, Japan, TuA2-3 (Invited), June 2010.
  6. H. Iwasaki, T. Sugio, T. Tanimura, K. Takeuchi, and K. Shimomura, "Waveguide design of variable refractive-index waveguide array demultiplexer and wavelength selective switch", The 14th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2009), Hong Kong, ThLP31, July 2009.
  7. Y. Murakami, Y. Shimizu, T. Sugio, and K. Shimomura, "Switching characteristics in variable index arrayed waveguide wavelength selective switch", The 14th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2009), Hong Kong, ThA3, July 2009.
  8. Y. Saito, M. Akaishi, T. Inoue, Y. Suzuki, F. Kawashima, and K. Shimomura, "InAs QDs broadband LED using double-cap procedure and selective MOVPE growth", The 14th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2009), Hong Kong, WI1, July 2009.
  9. Y. Shimizu, H. Iwasaki, T. Sugio, Y. Murakami and K. Shimomura, "Wavelength selective switch using GaInAs/InP MQW variable index arrayed waveguides", Conference on Lasers and Electro-Optics International Quantum Electronics Conference (CLEO/IQEC 2009), Baltimore, USA, JTuD48, June 2009.
  10. T. Sugio, M. Akaishi, and K. Shimomura, "Carrier induced refractive index change in InAs quantum dots on InP (001) substrates", 2008 International Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW 2008), Lake Saiko, Japan, Poster Session 4, P28, Aug. 2008.
  11. H. Iwasaki, Y. Shimizu, and

- K. Shimomura, "Switching characteristics in wavelength switch using selectively grown waveguide array by thermo-optic effect", 2008 International Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW 2008), Lake Saiko, Japan, Poster Session 3, P30, Aug. 2008.
12. M. Akaishi, Y. Saito, and K. Shimomura, "Dependency of InAs QDs using GaxIn1-xAs second cap layer in the Double-cap procedure", 2008 International Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW 2008), Lake Saiko, Japan, Poster Session 3, P14, Aug. 2008.
  13. K. Shimomura, "Selective MOVPE grown semiconductor optical waveguide array and its application for optical devices," 2008 International Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW 2008), Lake Saiko, Japan, Session Sa1 (Invited), Aug. 2008.
  14. Y. Saito, T. Okawa, M. Akaishi, and K. Shimomura, "Wideband wavelength electro luminescence from InAs/InP QDs using double-cap procedure by MOVPE selective area growth", 14th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, Metz, France, Th-B1.2, June 2008.
  15. M. Akaishi, T. Okawa, Y. Saito, and K. Shimomura, "InAs/InP QDs using GaxIn1-xAs cap layer in double-cap procedure by MOVPE selective area growth", 14th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, Metz, France, Tu-P.1, June 2008.
  16. 三枝知充, 川島史裕, 廣岡雅人, 下村和彦, 「InP 基板上 Ga<sub>0.69</sub>In<sub>0.31</sub>As バッファ層を用いた選択成長 InAs 量子ドットの発光特性」, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 27a-P8-6, 平成 23 年 3 月
  17. 岩根優人, 三枝知充, 廣岡雅人, 川島史裕, 小冷亮太, 下村和彦, 「GaxIn1-xAs セカンドキャップ層を用いたダブルキャップ法 InAs/InP 量子ドットの発光特性および形状」, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 24p-BQ-12, 平成 23 年 3 月
  18. 柳 智史, 山崎 勇輝, 村上洋介, 下村和彦, 「三角ヒーターを用いた GaInAs/InP MQW 波長光スイッチの消費電力低減」, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 24p-KA-3, 平成 23 年 3 月
  19. 牧野辰則, 谷村昂, 村上洋介, 青柳孝典, 下村和彦, 「階段型屈折率分布アレイ導波路構造におけるランダムスイッチング動作の数値解析」, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 24p-KA-2, 平成 23 年 3 月
  20. 青柳孝典, 谷村 昂, 村上洋介, 下村和彦, 「キャリア注入型アレイ導波路におけるスイッチング特性(II)」, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 24p-KA-1, 平成 23 年 3 月
  21. 村上洋介, 谷村 昂, 青柳孝典, 下村和彦, 「Ti/Au ヒーターを用いた選択成長アレイ導波路における波長スイッチング特性」, 第 71 回応用物理学学術講演会, 14p-G-2, 平成 22 年 9 月, 長崎大学
  22. 川島史裕, 鈴木勇介, 井上朋紀, 下村和彦, 「LP-MOVPE による選択成長とダブルキャップ法およびバッファ層組成変化を用いた広帯域量子ドット LED の作製」, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 19p-E-18, 平成 22 年 3 月, 東海大学
  23. 杉尾崇行, 青柳孝典, 谷村昂, 下村和彦, 「キャリア注入による階段型屈折率分布アレイ導波路のスイッチング特性」, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 17a-N-3, 平成 22 年 3 月, 東海大学
  24. 谷村昂, 杉尾崇行, 村上洋介, 青柳孝典, 下村和彦, 「階段型屈折率分布アレイ導波路構造波長選択スイッチにおけるスイッチング動作の数値解析」, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 17a-N-2, 平成 22 年 3 月, 東海大学
  25. 村上 洋介, 杉尾 崇行, 谷村 昂, 下村和彦, 「熱光学効果型 GaInAs/InP MQW 波長選択スイッチの消費電力低減」, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 17a-N-1, 平成 22 年 3 月, 東海大学
- [図書] (計 1 件)  
下村和彦 (分担執筆・第 2 章第 5 節)株式会社 エヌ・ディー・エス, 量子ドットエレクトロニクスの最前線, 307-317, 2011 年 3 月
- [その他]  
ホームページ等  
<http://pic.ee.sophia.ac.jp>
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