

平成21年 5月25日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19760231

研究課題名（和文） SOI 導波路上単一モード半導体薄膜レーザに関する研究

研究課題名（英文） Research of single mode semiconductor membrane laser on SOI waveguide

研究代表者

丸山 武男（MARUYAMA TAKEO）

金沢大学・電子情報学系・准教授

研究者番号：60345379

研究成果の概要：チップ間光インターコネクションを行うためには、電子デバイスと光デバイスとをチップ内に集積する必要があり、そのための技術開発が急務となる。本研究は、これまで半導体レーザとして実績のある III-V 族化合物半導体（GaInAsP/InP）を SOI 基板に直接貼り付けることによりシリコン LSI 上での集積化に適した単一モード半導体レーザの作製を行った。その結果、SOI 基板上への光励起における単一モード発振および高温(80℃)動作、さらに電流注入構造を試作し、LED およびレーザ発振を実現した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,600,000	0	2,600,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	180,000	3,380,000

研究分野：光エレクトロニクス

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：半導体レーザ、集積レーザ、シリコンフォトニクス、光集積回路、分布帰還形レーザ、ウエハボンディング、光導波路

1. 研究開始当初の背景

伝送容量は年々増加の一途をたどり、長距離伝送において電氣的伝送は困難となり、1Gbps のイーサネットや、最近ではスーパーコンピュータのボード間で光配線が必要となっている。今後、伝送容量は拡大し続け、40Gbps では 1cm の距離でも光伝送が有利となるため、ボード内でも光伝送が必要となる。この信号処理は電子デバイスで行うためシリコン基板との融合が必要である。そして SOI(Silicon On Insulator)基板上の光集積回路 (Photonics Integrated

Circuits:PICs)は SiO₂ と高屈折率差を有するため、光回路の小型化に有利である。このシリコン導波路やシリコン基板上への受動素子の研究は国内外で盛んに研究されていた。

一方、シリコン基板上への発光素子実現の必要性も広く認識されており、シリコン微結晶、シリコンのラマン効果、化合物半導体結晶成長などの試みが発表されていたが、集積化には向かない構造であった。

そこで当時、低消費電力動作が期待できる薄膜レーザを光励起動作し、かつ化合物半導体をシリコン(または SOI)基板上に直接貼り付けるこ

とを達成し、光強度の劣化も抑えられていた。そこで、これらの技術を用いて薄膜半導体レーザを SOI 基板上に貼り付けることで光集積回路が実現出来ると着想するに至った。

2. 研究の目的

本研究は、SOI 導波路上へ直接貼付けた半導体薄膜構造による強光閉じ込め効果を用いた半導体薄膜レーザの電流注入発振を実現し、その極限的低電力・高効率動作の可能性を実証することを目的とする。そして以下の2点を重点的に行う。

(1) 分布帰還型 SOI 導波路の形成および分布帰還型 SOI 導波路上半導体薄膜レーザの達成

(2) 電流注入プロセスの確立および電流注入発振

(1)では、SOI 導波路を分布帰還型に微細加工することで、単一モード導波路の実現を行う。そして、この単一モード導波路上に GaInAsP/InP 半導体薄膜の直接貼付を行うことで単一モード半導体薄膜レーザの作製を実現する。この素子に光励起をすることにより単一モード発振を達成を目指した。

(2)では、さらに電流注入プロセスを確立する。半導体薄膜レーザは、半導体薄膜の上下を SiO₂ や誘電体など絶縁物で挟んでいるため、通常の縦方向注入が困難である。そこで図 1 のようにプレーナ電極構造を形成する。ここでは、n-InP 層を選択エッチングによって残すプロセスを確立する必要があり、またドーピング濃度などを制御して損失と電気抵抗の均衡を評価する必要がある。そして、pn ダイオード特性および電流注入発振を目指した。

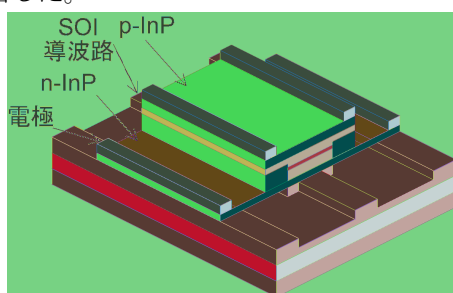


図 1 半導体薄膜レーザの電流注入構造

3. 研究の方法

電子ビーム露光法と CF₄ 反応性イオンエッチングによって SOI 基板上に周期 250nm 前後の分布帰還型回折格子形成プロセスを作製する。そして、この回折格子に半導体薄膜レーザを実現することにより単一モード動作が期待できる。この SOI 基板上に半導体薄膜構造の転写は、水素雰囲気中 300°C 程度のアニール下において強固な結合が実現している。この方法により発光強度に劣化は無

く、レーザ作製プロセスも確立している。この技術を用い、分布帰還型 SOI 導波路上へ半導体薄膜を転写し、光励起による低しきい値動作を目的とした半導体薄膜レーザを試作した。特に、光励起発振における単一モード動作の確認、分布帰還型回折格子の周期が発振波長を制御していることの確認を行った。さらに、基板を加熱することで、高温動作の確認も行った。

さらに電流注入動作を目的として、化合物半導体としてドーピングした基板を準備した。これによって pn 接合が可能となる。また電流狭窄構造として貼付後にメサストラップを形成した。メサ構造作製プロセスでは上部電極をそのままエッチングマスクにした。半導体のエッチングには塩酸系(InP エッチング用)と硫酸系(GaInAsP エッチング用)を用いて行った。そうすることで選択エッチングが可能となり、InP と GaInAsP とのエッチングレートの差によって極薄膜を残すことが可能となる。この薄膜によって横方向電流注入が可能となる。

そして、まずは LED 構造を作製し、次に分布帰還型 SOI 導波路上半導体薄膜レーザを作製した。

4. 研究成果

本研究では、これまで半導体レーザとして実績のある III-V 族化合物半導体 (GaInAsP/InP) を SOI 基板上に直接貼り付けることによりシリコン LSI 上での集積化に適した単一モード半導体レーザの実現を目指し、下記の結果を得た。

- (1) CH₄/H₂-RIE によるエッチングにおいて、活性層上部からのプラズマのダメージの存在を光励起測定 (PL) によって示し、その改善策として上部光閉じ込め層 (上部 OCL) を従来の 40 nm から 80 nm と厚膜化する方法を提案した。その評価として上部 OCL が 40 nm と 80 nm の量子井戸レーザを作製し、電流注入測定 (EL) によってその電流-光出力を測定し、比較することにより、内部量子効率 (η_i) が 53 % から 75 % に改善されることを確認した。これらの結果より、CH₄/H₂-RIE による活性層上部からのダメージを低減するためには、元基板構造において上部層を従来構造よりも 40 nm 厚膜化した構造が有効であることを示した。
- (2) SOI 基板上半導体レーザは低熱伝導率材料である SiO₂ を有しているため、放熱特性が悪いと考えられている。今回、リブ導波路構造を有する半導体薄膜レーザを

作製し、Si層を放熱層として作用させることで85°Cまでの高温動作を実現した(図2)。これまでのSOI基板上半導体薄膜レーザと比較して、熱特性の改善(最高動作温度 $T_{max} = 60^{\circ}\text{C} \rightarrow 85^{\circ}\text{C}$ 、しきい値特性温度 $T_0 = 22\text{K} \rightarrow 64\text{K}$)に成功した。

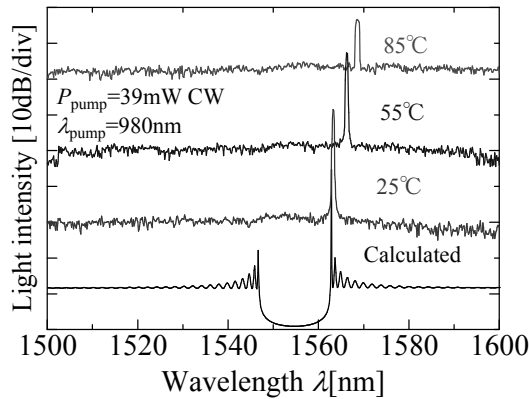


図2 光励起によるレーザ発振スペクトル

- (3) 半導体薄膜レーザは、薄膜構造のため電流注入構造の作製が困難であり、光励起でのみの動作であった。今回、薄膜(60nm)n-InPクラッド層構造を有するGaInAsP/InP基板をSOI基板上に直接貼り付け、横方向電流注入構造pn-LEDを作製した。この素子において整流特性と量子井戸からの自然放出光を確認した。
- (3) さらに、上記のLED構造をレーザ構造に拡張してレーザ素子を作製した。このとき、薄膜かつ横方向電流注入構造は、薄膜部分でのシート抵抗が大きな問題になると考えられる。今回n-InP層のみを薄膜化したGaInAsP/InP-DFBレーザをSOI基板上に作製した。図3に示すようなストライプ幅25μm、共振器長1mmの素子において室温パルス条件下でレーザ発振を実現し、しきい値電流104mA、発振波長1543nm、副モード抑圧比28dBを得た(図4)。

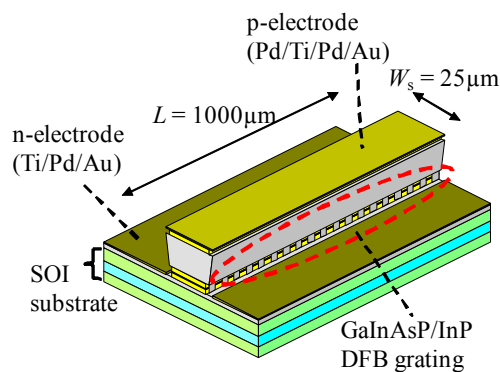


図3 SOI基板上化合物半導体DFBレーザ

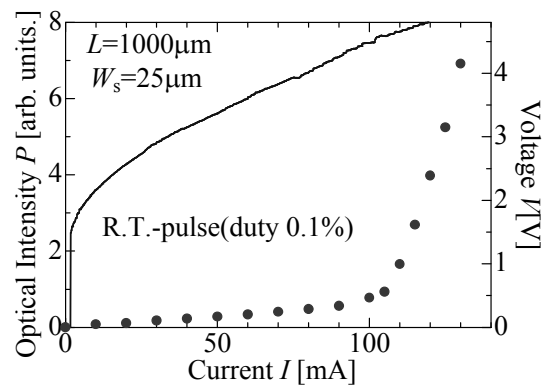


図4 電流注入レーザのI-L I-V特性

本研究において、電流注入動作を世界で初めて実現した。今後は、室温連続動作化およびしきい値電流の低減を行いたい。そのために、作製プロセスの見直し(特にドーピング濃度や構造の再設計)を行う必要がある。

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10件) 全て査読有

1. K. Inoue, D. Plumwongrot, N. Nishiyama, S. Sakamoto, H. Enomoto, S. Tamura, T. Maruyama and S. Arai, "Loss reduction of Si wire waveguide fabricated by edge-enhancement writing for electron beam lithography and reactive ion etching using double layered resist mask with C_{60} ," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 3, pp. 030208(3pages), Mar. 2009.
2. T. Okumura, T. Maruyama, H. Yonezawa, N. Nishiyama and S. Arai, "Injection-type GaInAsP-InP-Si distributed-feedback laser directly bonded on silicon-on-insulator substrate," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 21, no. 5, pp. 283-285, Mar. 2009.
3. D. Plumwongrot, T. Maruyama, A. Haque, H. Yagi, K. Miura, Y. Nishimoto and S. Arai "Polarization anisotropy of spontaneous emission spectra in GaInAsP/InP quantum-wire structures," *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 47, no. 5 pp 3735-3741, May 2008.
4. T. Okumura, T. Maruyama, M. Kanemaru, S. Sakamoto and S. Arai, "Single-mode operation of GaInAsP/InP-membrane distributed feedback (DFB) lasers bonded on silicon-on-insulator (SOI) substrate with rib-waveguide structure," *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 46, no. 48, pp. L1206 - L1208, Dec.

2007.

5. H. Naitoh, S. Sakamoto, M. Ohtake, T. Okumura, T. Maruyama, N. Nishiyama and S. Arai, "GaInAsP/InP membrane BH-DFB laser with air-bridge structure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 46, no. 47, pp. L1158 - L1160, Nov. 2007.
6. S. Sakamoto, H. Naitoh, M. Ohtake, Y. Nishimoto, T. Maruyama, N. Nishiyama and S. Arai, "85°C continuous-wave operation of GaInAsP/InP-membrane buried heterostructure distributed feedback lasers with polymer cladding Layer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 46, no. 47, pp. L1155 - L1157, Nov. 2007.
7. D. Plumwongrot, Y. Nishimoto, S. M. Ullah, Y. Tamura, M. Kurokawa, T. Maruyama, N. Nishiyama and S. Arai, "Bragg wavelength detuning in GaInAsP/InP DFB lasers with wirelike active regions," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 46, no. 45, pp. L1090 - L1092, Nov. 2007.
8. H. Itoh, M. Yoshita, H. Akiyama, D. Plumwongrot, T. Maruyama and S. Arai, "Micro-photoluminescence characterizations of GaInAsP/InP single quantum wires fabricated by dry etching and regrowth," *J. Appl. Phys.*, vol. 102, no. 9 pp. 093509-1-093509-5, Nov. 2007.
9. S. Sakamoto, H. Naitoh, M. Ohtake, Y. Nishimoto, S. Tamura, T. Maruyama, N. Nishiyama and S. Arai, "Strongly index-coupled membrane BH-DFB lasers with surface corrugation grating," *IEEE J. Sel. Topics Quantum. Electron.*, vol. 13, no. 5, pp. 1135-1141, Sep./Oct. 2007.
10. Y. Nishimoto, H. Yagi, K. Miura, D. Plumwongrot, K. Ohira, T. Maruyama and S. Arai, "High T0 operation of 1590 nm GaInAsP/InP quantum-wire distributed feedback lasers by Bragg wavelength detuning," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 46, no. 17, pp. L411-L413, Apr. 2007.

[学会発表] (計 29 件)
(国際会議)

1. K. Inoue, D. Plumwongrot, N. Nishiyama, S. Sakamoto, H. Enomoto, S. Tamura, T. Maruyama and S. Arai, "Loss reduction of Si wire waveguide on SOI substrate prepared by parallel plate RIE using double layered resist mask with C₆₀," *the IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference 2008 (NMDC 2008)*, Kyoto

(Japan), Mo P20, Oct. 20, 2008.

2. H. Yonezawa, T. Maruyama, T. Okumura, N. Nishiyama and S. Arai, "Injection type GaInAsP/InP DFB lasers directly bonded on SOI substrate," *International Nano-Optoelectronic Workshop 2008 (iNOW 2008)*, Tokyo, Saiko and Shonan (Japan), P4-16, Aug. 8, 2008.
3. K. Inoue, N. Nishiyama, H. Enomoto, S. Tamura, T. Maruyama and S. Arai, "Evaluation of Si wire waveguide fabricated by parallel plate RIE process using double layered EB resist containing C₆₀," *International Nano-Optoelectronic Workshop 2008 (iNOW 2008)*, Tokyo, Saiko and Shonan (Japan), P3-24, Aug. 7, 2008.
4. M. Kurokawa, D. Plumwongrot, T. Maruyama, N. Nishiyama and S. Arai, "CH₄/H₂-RIE induced optical property degradation in GaInAsP/InP quantum-well structures," *International Nano-Optoelectronic Workshop 2008 (iNOW 2008)*, Tokyo, Saiko and Shonan (Japan), P3-19, Aug. 7, 2008.
5. M. Kurokawa, D. Plumwongrot, K. Ozawa, T. Maruyama, S. Arai and N. Nishiyama, "RIE-plasma induced optical property degradation in GaInAsP/InP quantum-well structures," *The 20th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2008)*, Versailles (France), WeP39, May 28, 2008.
6. T. Okumura, T. Maruyama, H. Yonezawa, N. Nishiyama, S. Arai, "Injection type GaInAsP/InP/Si DFB lasers directly bonded on SOI substrate," *The 20th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2008)*, Versailles (France), TuA1.6, May 27, 2008.
7. D. Plumwongrot, M. Kurokawa, T. Okumura, Y. Nishimoto, T. Maruyama, N. Nishiyama, and S. Arai: "Reduction of RIE Induced Damage on Lasing Properties of GaInAsP/InP DQW Lasers Fabricated by 2-step Growths," *OPTO2008 (part of SPIE Photonics West 2008)*, San Jose (USA), Jan. 24, 2008.
8. D. Plumwongrot, Y. Tamura, Y. Nishimoto, M. Kurokawa, T. Maruyama, N. Nishiyama, and S. Arai, "Length dependencies of in-plane polarizations anisotropy in GaInAsP/InP quantum-wire structures fabricated by dry etching and regrowth process," *OPTO2008 (part of SPIE*

- Photonics West 2008*), San Jose (USA), 6902-4, Jan. 21, 2008.
9. D. Plumwongrot, Y. Tamura, T. Maruyama, N. Nishiyama, and S. Arai: "Fabrication of GaInAsP/InP Arbitrary Shaped Low Dimensional Quantum Structures," *The 20th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2007)*, Kyoto (Japan), 6A-4-51, Nov. 6, 2007.
 10. D. Plumwongrot, M. Kurokawa, T. Okumura, Y. Nishimoto, T. Maruyama, N. Nishiyama, and S. Arai: "Observation of RIE Induced Damage on Lasing Properties of GaInAsP/InP MQW Lasers Fabricated by 2-step Growths," *The 34th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2007)*, Kyoto (Japan), ThC-P9, Oct. 18, 2007.
 11. T. Maruyama, T. Okumura, M. Kanemaru, S. Sakamoto, S. Tamura, and S. Arai: "GaInAsP/InP Membrane DFB lasers directly boded on SOI substrate with rib-waveguide structure," *12th OptoElectronics and Communications Conference/16th Intl Conference on Integrated Optics & Optical Fiber Communication (OECC/IOOC 2007)*, Yokohama (Japan), 12D1-3, pp. 390-391, July 12, 2007.
 12. H. Naitoh, S. Sakamoto, M. Ohtake, T. Okumura, T. Maruyama, N. Nishiyama, and S. Arai: "80°C CW operation of GaInAsP/InP membrane BH-DFB laser with air-bridge structure," *The 19th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2007)*, Matsue (Japan), no.ThB1-2, pp.476-479, May 17, 2007.
 13. Y. Nishimoto, D. Plumwongrot, S. M. Ullah, Y. Tamura, M. Kurokawa, T. Maruyama, N. Nishiyama, and S. Arai: "Improved temperature dependence of GaInAsP/InP DFB lasers with wirelike active regions by Bragg wavelength detuning," *The 19th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2007)*, Matsue (Japan), no.ThB2-3, pp.513-516, May 15, 2007.
 14. T. Okumura, T. Maruyama, M. Kanemaru, S. Sakamoto, S. Tamura, and S. Arai: "Fundamental-mode operation of GaInAsP/InP membrane DFB lasers bonded on SOI substrate and its waveguide integration," *The 19th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2007)*, Matsue (Japan), TuB2-2, pp.35-38, May 15, 2007.
 15. H. Itoh, M. Yoshita, H. Akiyama, D. Plumwongrot, T. Maruyama, S. Arai: "Photoluminescence of GaInAsP/InP single quantum wires with lateral widths down to 6 nm fabricated by dry etching and regrowth," *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2007)*, Baltimore (USA), CThGG3, May 10, 2007.
- (国内会議)
16. 西山伸彦、丸山武男、荒井滋久:「シリコン基板上半導体レーザ・発光デバイスの現状」, 2009年電子情報通信学会総合大会, CI-2-4, 愛媛, Mar. 18, 2009.
 17. 荒井滋久、丸山武男、西山伸彦、奥村忠嗣、黒川宗高、白尾瑞基、米澤英徳、近藤大介、伊藤瞳:「SOI上の半導体薄膜レーザ」, 第10回電子情報通信学会シリコンフォトニクス研究会, SIPH2008-15, 東京, Nov. 7, 2008. (招待講演)
 18. 高松英輝、山王紀明、丸山武男、飯山宏一:「CMOSプロセスによるアバランシェフォトダイオード」, 平成20年度電気関係学会北陸支部連合大会, D-22, 富山, Sep. 13, 2008.
 19. 小野裕佑、高村俊裕、丸山武男、飯山宏一:「PETをコア層に用いた有機光導波路の検討」, 平成20年度電気関係学会北陸支部連合大会, D-29, 富山, Sep. 13, 2008.
 20. 奥村忠嗣、丸山武男、米澤英徳、西山伸彦、荒井滋久:「SOI基板への直接貼り付け法によるGaInAsP/InP DFBレーザ」, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2008-29, pp. 45-50, 東京, Jun. 27, 2008.
 21. 井上敬太、プルームウオンロート・タノーム、西山伸彦、阪本真一、榎本晴基、田村茂雄、丸山武男、荒井滋久:「C60含有と非含有EBレジストZEPの重ね塗りによるSi導波路ドライエッチング形状の向上」, 第55回応用物理学関係連合講演会, 29p-ZG-15, 千葉, Mar. 29, 2008.
 22. 奥村忠嗣、丸山武男、米澤英徳、西山伸彦、荒井滋久:「直接貼付法によるSOI基板上注入形GaInAsP/InP DFBレーザ」, 第55回応用物理学関係連合講演会, 29p-ZQ-4, 千葉, Mar. 29, 2008.
 23. 黒川宗高、プルームウオンロート・タノーム、小沢浩二、丸山武男、西山伸彦、荒井滋

久:「GaInAsP/InP 量子井戸構造の RIE プラズマによる PL 強度劣化とアニールによる回復」, 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 28p-P9-7, 千葉, Mar. 28, 2008.

24. プルームウォンロート・タノーム、小沢浩二、黒川宗高、田村茂雄、丸山武男、西山伸彦、荒井滋久:「低温現象による GaInAsP/InP 量子細線構造の線幅ばらつきの低減」, 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 28p-E-18, 千葉, Mar. 28, 2008.
25. 丸山武男、奥村忠嗣、荒井滋久:「シリコン上レーザ実現への展望」, 2007 年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, CK-1-8, 鳥取, Sep. 10, 2007.(招待講演)
26. 黒川宗高、Dhanorm Plumwongrot、西本頼史、丸山武男、西山伸彦、荒井滋久:「2 段階 OMVPE 成長 GaInAsP/InP 量子井戸レーザにおける RIE プラズマ損傷とその低減」, 第 68 回応用物理学学会学術講演会, 7p-C-6, Digest III -p. 1162, 札幌, Sep. 7, 2007.
27. 奥村忠嗣、丸山武男、金丸正樹、荒井滋久:「直接貼付法による SOI 基板上 GaInAsP/InP-LED」, 第 68 回応用物理学学会学術講演会, 7a-C-13, Digest III -p. 1160, 札幌, Sep. 7, 2007.
28. Dhanorm Plumwongrot、田村洋介、西本頼史、黒川宗高、丸山武男、西山伸彦、荒井滋久:「Wire-Length Dependence of Polarization Anisotropy in GaInAsP/InP Quantum-Wire Structures」, 第 68 回応用物理学学会学術講演会, 7a-N-11, Digest III -p. 1421, 札幌, Sep. 7, 2007.
29. 内藤秀幸、阪本真一、大竹守、奥村忠嗣、丸山武男、西山伸彦、荒井滋久:「エアブリッジ構造を用いた GaInAsP/InP 半導体薄膜 BH-DFB レーザ」, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2007-21, pp. 19-22, 東京, Jun. 29, 2007.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸山 武男 (MARUYAMA TAKEO)

金沢大学・電子情報学系・准教授

研究者番号: 60345379