

研究種目：特定領域研究
研究期間：2005～2008
課題番号：17068011
研究課題名（和文）
量子情報処理への応用を目指した半導体レーザ励起集積非線形光学デバイスの研究
研究課題名（英文）
Research on Integrated Nonlinear-Optic Devices for Quantum Information Processing
研究代表者
栖原 敏明 (SUHARA TOSHIAKI)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90116054

研究成果の概要： 量子情報処理用の集積非線形光学デバイスの研究に取り組み、(1)光損傷耐性MgO:LiNbO₃分極反転構造の紫外光照射電圧印加による形成や結晶接合理込み導波路形成などの新作製技術開発、(2)単一光子検出用波長変換デバイスの高効率化(30%)、(3)初の導波型直交偏波光子対発生デバイスの実現、(4)小型高効率な直交偏波および平行偏波の量子エンタングル光子対発生デバイスの提案・作製と機能実証 などの成果を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	24,000,000	0	24,000,000
2006年度	30,200,000	0	30,200,000
2007年度	24,000,000	0	24,000,000
2008年度	19,500,000	0	19,500,000
年度			
総計	97,700,000	0	97,700,000

研究分野：量子光電子工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用光学・量子光工学

キーワード：光集積回路、半導体レーザ、非線形光学、量子光学デバイス、光導波路

1. 研究開始当初の背景

光エレクトロニクス分野では既存技術の限界を打開する技術イノベーションを目指して、光子を用いた量子暗号や量子情報通信、量子コンピュータなどの基礎研究が活発化していた。特に、量子情報の研究は欧州と国内で活発化していたが、理論と基礎実験が中心で集積デバイス化は殆ど検討されていなかった。以前から非線形光学デバイスは活発に研究されていたが、波長変換応用が主眼で量子光学機能実現を目的としていなかった。近年、欧米で非線形光学デバイスによるスクイズド光発生への検討が始まるなど、この分野

への関心が高まっていたが、非線形光学と半導体レーザを組み合わせる理論と実験の両面に取り組もうとする研究は内外ともに見当たらなかった。本グループは、光記録・通信のための波長変換デバイスを中心とする導波型非線形光学デバイスの研究を続け、また集積半導体レーザの研究を行ってきたので、多くの技術的蓄積があり、量子光学機能の理論解析、導波型非線形光学光子対発生デバイスの設計とプロトタイプ作製および基礎実験、スクイズド光発生用集積半導体レーザ作製などを行い、良好な予備の結果を得ていた。

2. 研究の目的

本研究は、本グループが研究を続けてきた強誘電体導波路擬似位相整合非線形光学デバイスと集積半導体レーザの理論と技術を基礎として、量子光学機能をもつ新デバイスの実現可能性を探求することを目的とした。非線形光学効果を利用すれば、スクイズド光発生、相関光子対発生、量子エンタングル光子対発生などの機能を実現できる。導波型擬似位相整合型デバイスは、単一材料で広い光波長域に対応でき、顕著な高効率化が可能であるので、半導体レーザ励起で作動するデバイスの実現が期待できる。一方、集積半導体レーザは量子情報技術用非線形光学デバイスの励起光源として最適である。両者を集積することにより、光子干渉計など複雑な量子光学機能をもつコンパクトなデバイスが構築できる。このような可能性を探求し実証するため、具体的にデバイス構成を提案し、量子光学特性を理論解析し、基本デバイスを実際に設計・試作して実験を行って、機能・特性を明らかにする。材料と構成はLiNbO₃周期分極反転導波路構造とInGaAs歪量子井戸分布ブラッグ反射型レーザ構造に焦点を絞り、最適設計により種々の量子光学機能を実現・実証し高性能化することを研究方針とした。これにより上記新分野での将来の応用の可能性を明らかにすることを目標とした。

3. 研究の方法

新世代の光通信・光情報処理の技術革新を図るためには、既存技術では利用されていなかった新たな光波制御機能の原理を見出し、またこれを可能にする極微構造や集積デバイス構造を創製することが重要である。量子光学と非線形光学の学術分野を情報通信技術としての実応用のために飛躍的に発展させることを目指して、原理探索とデバイス創製および可能性実証を主眼として研究を推進した。種々の量子光学機能を実現する高性能擬似位相整合非線形光学デバイス、励起用半導体レーザおよびこれらの集積化について可能性探索・理論解析を行い、デバイス作製のための要素技術を開発・改善し、提案した新デバイスを実際に作製して実験による機能確認と特性評価・改善を行った。

4. 研究成果

主要な研究成果は以下のとおりである。

(1) 新作製要素技術

導波路擬似位相整合非線形光学デバイスの高効率化と光損傷耐性の解決のため、光損傷耐性MgO添加LiNbO₃結晶における擬似位相整合用周期分極反転構造形成の技術を検討した。本グループが見出した新方法である周期的紫外光照射電圧印加法の改善を行った。また絶縁膜装荷加熱電圧印加による新たな

形成法を見出した（図1）。

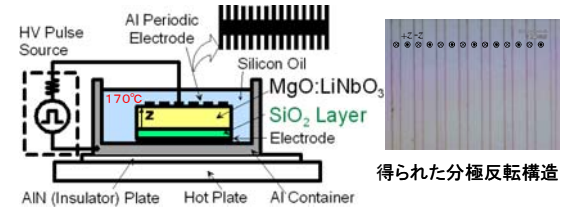


図1 絶縁膜装荷加熱電圧印加による周期分極反転構造形成

また非線形光学デバイスの高効率化を目的として、結晶直接接合技術を用いた埋込み導波路作製の検討を行い、モード対称性に優れた埋込み導波路形成の可能性を見出した（図2）。

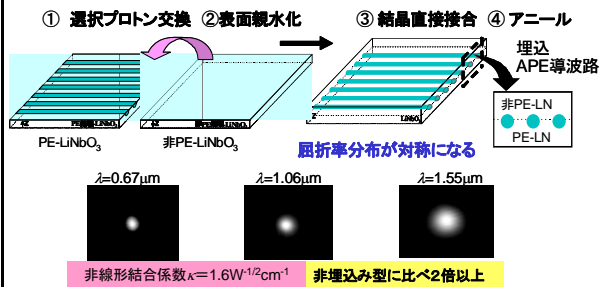


図2 結晶直接接合による埋込み光導波路の作製

(2) 単一光子検出用波長変換デバイス

波長変換単一光子検出のための和周波発生型光子波長変換デバイスの特性改善のため、プロトン交換・逆交換法による光導波路埋め込みを行い、量子効率を30%まで改善した（図3）。

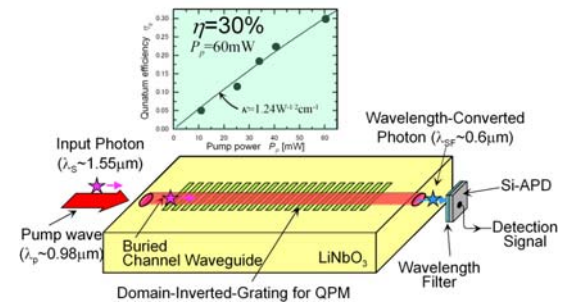


図3 単一光子検出用和周波発生型波長変換デバイス

(3) 導波直交偏波光子対発生デバイス

導波型擬似位相整合光子対発生デバイスの量子論解析を行って特性を解明するとともに設計法を確立した。非線形テンソル非対角成分 d_{24} ($=d_{31}$) を用いたタイプ II 擬似位相整合の採用により、導波型直交偏波光子対発生デバイス（図4）を初めて作製し動作を

証した。この成果は研究者の関心を引き、国内外で類似の研究が活発化した。

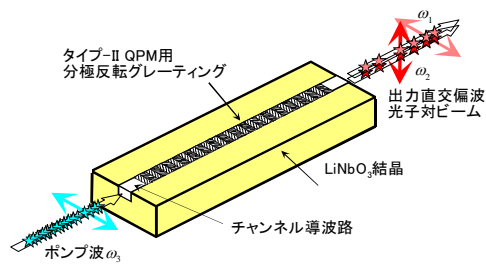


図4 導波型直交偏波光子対発生デバイス

また、伝令付単一光子列発生のための非縮退光子対発生デバイスを設計・試作して特性評価し、光通信波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯光子と伝令信号への光電変換に適した $0.8\mu\text{m}$ 帯光子の発生と量子相関を確認した。

(4) 量子エンタングル光子対発生デバイス

簡単なデバイス構成の直交偏波エンタングル光子対発生デバイス、高効率な平行偏波エンタングル光子対発生デバイス、応用範囲が広いポストセレクションフリー直交偏波2波長エンタングル光子対発生デバイスなど、各種の量子エンタングル光子対発生デバイスを考案し、実際に設計・作製して量子干渉実験や偏光相関測定、ベル不等式破れ測定実験などによりその機能と性能を実証した(図5)。

これらの成果は研究者の関心を引き、国内外の学術雑誌から招待解説論文執筆の依頼を受けるなど、高く評価されている。

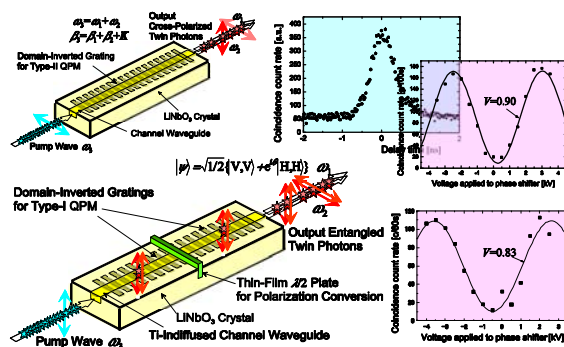


図5 導波型擬位相整合量子エンタングル光子対発生デバイスと量子相関・量子干渉実験結果

(5) InGaAs 曲線 DBR レーザを量子機能実現の観点から改善し、20mA の低閾値、74% の微分量子効率、250mW の最高出力、50dB のサイドモード抑圧比などの高性能を達成した。また非線形光学量子機能デバイスの励起用半導体レーザとしての AlGaAs および AlGaInP 量

子井戸 DBR レーザの特性改善を行い、それぞれ 110mW、30mW の CW 単一モード出力を得た。

これらの成果は研究者の関心を引き、国内外の会議から招待講演の依頼を受けるなど、高く評価されている。

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 20 件)

- ① T. Suhara, G. Nakaya, J. Kawashima and M. Fujimura: “Quasi-phase matched waveguide devices for generation of postselection-free polarization-entangled twin photons,” IEEE Photon. Tech. Lett., vol.21, 2009 to be published、査読有
- ② S. Takushima, M. Uemukai and T. Suhara, “GaInP red distributed-Bragg-reflector laser integrated with phase-shifted grating coupler for multispot focusing,” Jpn. J. Appl. Phys., vol.48, 030206, 2009、査読有
- ③ J. Kawashima, M. Fujimura and T. Suhara, “Type-I quasi-phase-matched waveguide device for polarization-entangled twin photon generation,” IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 21, No. 9, pp. 566-568, 2009、査読有
- ④ 栖原敏明, 藤村昌寿: “偏波エンタングル光子対発生用導波路非線形光学デバイス,” レーザー研究, vol. 37, No. 4, pp. 264-270, 2009、査読有
- ⑤ T. Suhara, “Generation of quantum-entangled twin photons by waveguide nonlinear optic devices (Invited Review Paper),” Laser & Photon. Rev. vol. 3, 2009 DOI 10.1002/lpor.200810054、査読有
- ⑥ M. Fujimura, K. Beniya and T. Suhara, “Buried annealed/proton-exchanged LiNbO₃ waveguides fabricated with direct bonding technique,” Electron. Lett. vol. 44, No. 14, pp. 856-857, 2008、査読有
- ⑦ M. Fujimura and T. Suhara, “Formation of MgO:LiNbO₃ domain-inverted gratings by voltage application under UV light irradiation at room temperature,” Advances in OptoElectronics, vol. 2008, Article ID 421054, 5 pages, Hindawi Pub., 2008、査読有
- ⑧ M. Fujimura, H. Okabe, K. Beniya and T. Suhara, “Waveguide quasi-phase-matched sum-frequency generation

- device pumped by InGaAs laser diode for single-photon detection in communication wavelength band,” Jpn. J. Appl. Phys., vol.46, No.9A, pp.5868-5870, 2007、査読有
- ⑨ M. Fujimura, H. Tsuchimoto and T. Sahara, “Yb:LiNbO₃ annealed/proton-exchanged waveguide lasers pumped by InGaAs laser diode at 980nm wavelength,” Jpn. J. Appl. Phys., vol.46, No.8B, pp.5447-5449, 2007、査読有
- ⑩ N. Horikawa, T. Tsubouchi, M. Fujimura and T. Sahara, “Formation of domain-inverted grating in MgO:LiNbO₃ by voltage application with insulation layer cladding,” Jpn. J. Appl. Phys., vol.46, No.8A, pp.5178-5180, 2007、査読有
- ⑪ T. Sahara, H. Okabe and M. Fujimura, “Generation of polarization-entangled twin photons by type-II quasi-phase matched waveguide nonlinear-optic device,” IEEE Photon. Tech. Lett., vol.19 No.14, pp.1093-1095, 2007、査読有
- ⑫ M. Fujimura, H. Tsuchimoto and T. Sahara, “Yb-indiffused LiNbO₃ annealed / proton-exchanged waveguide lasers,” Electronics and Communications in Japan, Pt.2, vol.90, No.6, pp.10-17, 2007、査読有
- ⑬ 上向井正裕, 野津俊介, 栖原敏明: “曲線グレーティングを用いたInGaAs量子井戸DBRレーザの高性能化,” 電子情報通信学会論文誌 C, J89-C, No.12, pp.1097-1102, 2006、査読有
- ⑭ 藤村昌寿, 土本秀和, 栖原敏明: “Yb熱拡散添加LiNbO₃アニール・プロトン交換導波路レーザ,” 電子情報通信学会論文誌 C, vol. J89-C, No.11, pp.918-924, 2006、査読有
- ⑮ M. Uemukai, H. Miyamoto, Y. Yamada, Y. Sharma and T. Sahara, “Integration of surface-emitting red DBR laser and microfluidic structure for bio-molecular sensing,” Jpn. J. Appl. Phys., vol.45, No.8B, pp.6738-6741, 2006、査読有
- ⑯ T. Sahara and T. Nosaka, “Quantum theory analysis of loss effects in guided nonlinear-optic twin-photon generation,” IEEE J. Quantum Electron., vol.42, No.8, pp.777-784, 2006、査読有
- ⑰ T. Nosaka, B. K. Das, M. Fujimura and T. Sahara, “Cross-polarized twin photon generation device using quasi-phase matched LiNbO₃ waveguide,” IEEE Photon. Tech. Lett., vol.18, No.1, pp.124-126, 2006、査読有
- ⑱ M. Uemukai, S. Nozu and T. Sahara, “High-efficiency InGaAs QW distributed Bragg reflector laser with curved grating for squeezed light generation,” IEEE J. Selected Topics Quantum Electron., vol.11, No.5, pp.1143-1147, 2005、査読有
- ⑲ T. Sahara and H. Kintaka, “Quantum theory analysis of twin-photon beams generated by parametric fluorescence,” IEEE J. Quantum Electron., vol.41, No.9, pp.1203-1212, 2005、査読有
- ⑳ J. S. Selvan, M. Fujimura and T. Sahara, “Fabrication of Zn-indiffused LiNbO₃ optical waveguides using ZnS as diffusion source,” Jpn. J. Appl. Phys., vol.44, Pt.1, No.5A, pp.3075-3076, 2005、査読有
- [学会発表] (計20件)
- ① M. Uemukai, S. Ikeda and T. Sahara, “AlGaAs quantum well distributed Bragg reflector laser using surface curved grating” The third Int. Laser, Light-Wave and Microwave Conference, 23-TP1-6, Yokohama, April 23-25, 2008、査読有
- ② J. Kawashima, M. Fujimura and T. Sahara, “Type I quasi-phase-matched Ti:LiNbO₃ waveguide device for polarization-entangled twin photon generation,” The third Int. Laser, Light-Wave and Microwave Conference, 23-TP2 -1, Yokohama, April 23-25 2008、査読有
- ③ M. Fujimura, H. Okabe, K. Beniya and T. Sahara, “Waveguide QPM-SFG device pumped by InGaAs laser diode for single photon detection in communication band,” Microoptic Conference, K3, pp.326-327, Takamatsu Kagawa, Oct.28-31, 2007、査読有
- ④ M. Uemukai, Y. Yamada and T. Sahara, “Surface-emitting red DBR laser array for semiconductor laser-induced fluorescence biosensing,” Microoptic Conference, J5, pp.316-317, Takamatsu Kagawa, Oct.28-31, 2007、査読有
- ⑤ M. Uemukai and T. Sahara, “High-efficiency distributed Bragg reflector laser with curved grating for squeezed light generation,” (Invited Paper) the 7-th Pacific Rim

- Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim 2007), Seoul, Korea, ThA3-1, pp. 1381-1382, August 26-31, 2007、査読有
- ⑥ T. Tsubouchi, N. Horikawa, M. Fujimura and T. Suhara, "Formation of MgO:LiNbO₃ domain-inverted grating for quasi-phase matching by voltage application with insulation layer cladding," OptoElectronics and Communication Conference, International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communications, 12P-33, pp. 518-519, Yokohama, July 9-13, 2007、査読有
- ⑦ T. Suhara, "Waveguide quasi-phase-matched nonlinear-optic devices for photonic communications," (Invited Paper) 2007 Japan-Italy Bilateral Workshop on Photonics for Communication, Technical Digest pp. 5-8, Osaka, Japan, July 5-7, 2007、査読無
- ⑧ T. Suhara, H. Okabe and M. Fujimura, "Generation of polarization-entangled twin photons by type-II QPM waveguide NLO device," European Conf. Integrated Optics (ECIO'07), Copenhagen, Denmark, ThE2, April 25-27, 2007、査読有
- ⑨ M. Fujimura, H. Tsuchimoto and T. Suhara, "Yb:LiNbO₃ annealed/proton-exchanged waveguide lasers pumped by InGaAs laser diode at 980nm wavelength," Microoptics Conference (MOC'06), A-3, pp. 40-41, Seoul, Sept. 10-14, 2006、査読有
- ⑩ M. Fujimura and T. Suhara, "Efficient quasi-phase-matched difference-frequency generation device with buried LiNbO₃ waveguide for optical communication," The third International Nanophotonics Symposium Handai: Nano Biophotonics Science & Technology, P-39, p. 55, Osaka, July 6-8, 2006、査読無
- ⑪ M. Uemukai and T. Suhara, "Integration of surface-emitting red DBR laser and microfluidic structure for bio-molecular sensing," The third International Nano-photonics Symposium Handai: Nano Biophotonics Science & Technology, P-9, p. 25, Osaka, July 6-8, 2006、査読無
- ⑫ T. Suhara and M. Uemukai, "Integrated photonic devices using semiconductor quantum-well structures," The third International Nanophotonics Symposium Handai: Nano Biophotonics Science & Technology, O-11, p. 11, Osaka, July 6-8, 2006、査読無
- ⑬ T. Suhara, M. Fujimura and M. Uemukai, "Research on integrated photonic devices using semiconductor nano-structures," Handai Nanoscience and Nano-technology International Symposium, P34, Abstracts pp. 100-101, Jan. 2006、査読無
- ⑭ M. Uemukai, H. Miyamoto, Y. Yamada, Y. D. Sharma and T. Suhara, "Integration of surface-emitting red DBR laser and microfluidic structure for bio-molecular sensing," Microoptics Conference (MOC'05), pp. 294-295, Tokyo, Oct. 30-Nov. 2, 2005、査読有
- ⑮ S. Nozu, T. Ishida, M. Uemukai and T. Suhara, "Cascaded high-efficiency InGaAs QW DBR lasers for generation of quantum-correlated twin beams," Microoptics Conference (MOC'05), H63, pp. 242-243, Tokyo, Oct. 30-Nov. 2, 2005、査読有
- ⑯ M. Fujimura, S. Yoshimoto and T. Suhara, "Application of photoconductive layer for improvement of domain-inverted grating formation in MgO:LiNbO₃ by applying voltage under ultraviolet light," Microoptics Conference (MOC'05), H17, pp. 150-151, Tokyo, Oct. 30-Nov. 2, 2005、査読有
- ⑰ T. Suhara, "Quasi-phase matched waveguide nonlinear-optic devices," China-Japan Joint Symposium on Nano and Nonlinear Photonics, Tech. Digest., pp. 43-44, Sept. 12-14, 2005、査読有
- ⑱ H. Miyamoto, M. Uemukai and T. Suhara, "GaInP quantum-well surface-emitting distributed-Bragg-reflector laser using curved gratings," Int. Conf. Quantum Electronics and Pacific Rim Conf. on Lasers and Electro-Optics, CWAB3-P19, pp. 832-833, Tokyo, July 11-15, 2005、査読有
- ⑲ H. Tsuchimoto, M. Fujimura and T. Suhara, "Design and fabrication of Yb-indiffused LiNbO₃ annealed/proton-exchanged waveguide lasers," Int. Conf. Quantum Electronics and Pacific Rim Conf. Lasers and Electro-Optics, CTuK4-6, pp. 443-444 Tokyo, July 11-15, 2005、査読有
- ⑳ T. Nosaka, B. K. Das, M. Fujimura and T. Suhara, "Fabrication and characterization of cross-polarized twin photon generation device using

quasi-phase matched LiNbO₃ waveguide,” Int. Conf. Quantum Electronics 2005 and Pacific Rim Conf. Lasers and Electro-Optics 2005, CTuK2-2, pp.171-172, Tokyo, July 11-15, 2005、査読有

〔図書〕（計4件）

- ① T.Suhara, “Integrated optics,” in Y. B. Gianchandani et al eds., Comprehensive Microsystems, pp.165-200, Elsevier Ltd., Oxford, 2007、査読有
- ② T.Suhara and M.Uemukai, “Integrated photonic devices using semiconductor quantum-well structures,” in H. Masuhara, et al, eds., Handai Nanophotonics, Vol. 3, pp.387-409, Amsterdam, 2007、査読有
- ③ T.Suhara, “Periodic structures,” in K. Iga and Y. Kokubun, eds., “Encyclopedic handbook of integrated optics,” pp.271-282, CRC Press, Oct. 2005、査読有
- ④ 栖原敏明、光通信用波長変換デバイス、宮澤信太郎/栗村直監修「分極反転デバイスの基礎と応用」, pp.291-308, オプトロニクス社, 2005、査読有

〔その他〕

ホームページ等

<http://ioe.eei.eng.osaka-u.ac.jp>

<http://www.allopt.pi.titech.ac.jp/~Tokutei/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栖原 敏明 (SUHARA TOSHIAKI)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90116054

(2) 研究分担者

藤村 昌寿 (FUJIMURA MASATOSHI)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：80263218

上向井 正裕 (UEMUKAI MASAHIRO)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：80362672

(3) 連携研究者