様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成　21 年　5 月　8 日現在

研究種目：特定領域研究
研究期間：2005～2008
課題番号：17068002
研究課題名（和文）　MEMS 技術による光通信用高機能デバイスの研究

研究課題名（英文）　High functional telecommunication devices using MEMS technology

研究代表者
羽根　一博　（KAZUHIRO HANE）
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：50164893

研究成果の概要：
MEMS 技術により微細な立体構造とマイクロアクチュエータを集積した機能性の高い光通信デバイスを研究した．具体的には Si 自立格子を用いた光フィルタを製作し，格子周期を変調できることを示した．また周期可変のブレーズ格子を実現した．さらに Si 細線導波路波長選択スイッチを試作した．光路切り替えマイクロミラースイッチの高機能化のため角度センサの搭載や低電駆動法などを研究した．

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
２００５年度	18,000,000	0	18,000,000
２００６年度	20,700,000	0	20,700,000
２００７年度	17,100,000	0	17,100,000
２００８年度	12,100,000	0	12,100,000
年度			
総　計	67,900,000	0	67,900,000

研究分野：光通信用デバイス
科研費の分科・細目：
キーワード：光通信，波長選択フィルタ，MEMS，マイクロアクチュエータ

１．研究開始当初の背景

今世紀に入ってからも，通信容量は増加の一途をたどっている．特に波長多重方式の導入により，1 本のファイバーにおいて多波長の通信情報を同時に送受できるようになり，波長多重数は今後さらに増加すると考えられた．このため，多数の波長多重信号から，特定の波長を取り出すフィルタには高度な機能が要求されるようになってきた．任意の波長において受信信号および送信信号を自由に，他の信号に影響を与えることなく取り出すことが必要である．また，通信帯域をできるだけ広くして，多くの数の波長を多重化する必要がある．このような状況では，フィルタに要求される帯域は広がり，チューニング範囲の広い，かつ他の波長の信号へ影響のない波長選択方式のフィルタでデバイスが必要となっていた．また，波長多重方式では，光路を切り換える光スイッチデバイスにおいて，波長依存性がないことも重要である．また，このようなデバイスは体積が小さくエネルギー消費も少ないものが要求されるよ

うになっていた．このような背景のもと，広帯域可変機能や波長無依存光スイッチを実現できる小型の集積型デバイスとしてMEMS (Micro Electro Mechanical Ssytems)の導入が期待されていた．このような背景のもと光スイッチや波長可変フィルタへの試みも行われ始め，MEMS の性能は次第に向上していたが，なお信頼性や機能性の追及が望まれていた．

２．研究の目的

MEMS 技術により微細な立体構造とマイクロアクチュエータを集積した光通信デバイスを研究する．具体的には光路の制御のためにマイクロミラー，周期可変格子による機能性の高い光フィルタ，波長と構造の共鳴効果を制御する NEMS(Nano Electro Mechanical Systems)のフォトニックデバイス等を研究する．本研究はサブミクロン(0.2μm 以下)で深い(1μm 以上)加工のできるマイクロマシニング技術を用いて波長より小さい周期構造を製作し，マイクロアクチュエータを組み合わせることで新しい光学素子を開発することを目的としている．具体的には，光共鳴構造（ファブリ-ペロ共振器，ブラッググレーティング，フォトニック結晶，回折格子共鳴構造）をナノマシニングにより製作し，マイクロマシニングで製作したアクチュエータを組み合わせ，可変構造を備えた光共鳴デバイスを実現する．光路可変のマイクロミラーや光路位置合わせ用マイクロステージなど MEMS 技術による立体加工とマイクロアクチュエータを組み合わせることにより，光通信用デバイスの高度な集積技術を確立する．

３．研究の方法

MEMS 技術の導入により，デバイスの高機能化および集積化を行う．具体的には，MEMS 技術とフォトニックデバイスの結合により，従来，変形しないとして取り扱われてきたフォトニックデバイスの超微細なの構造を MEMS アクチュエータにより大きく変えることで，これまでにない可変機能を備えた光学素子を実現する．すなわち従来は定数と考えられてきた屈折率や偏光特性を等価的に変化させる．第 2 に MEMS 技術によりマイクロミラーなどのマイクロ部品を立体的に組み合わせることで，種々の機能光デバイスを有機的に結合する．また既存の光ファイバー系の光学素子と効率よく結合する．新規デバイスの実用的な実装技術にも貢献できる．

微細加工技術の進歩に伴い，回折光学素子をリソグラフィ技術により製作することは広く行われている．フレネルレンズや回折格子ビームスプリッターは情報機器などにおいて実用化レベルで開発されている．本研究では MEMS 技術により光共鳴構造を可変にする機能を備えたフォトニック構造素子を研究する．また大規模な光路の制御にはマイクロミラーのアレイが有効であると言われており，研究も進んでいる．しかし，それらの制御はオープンループのものがほとんどである．クローズループ制御に必要なセンサの集積については報告されていない．本研究では，それらをシリコン微細加工により試みる．

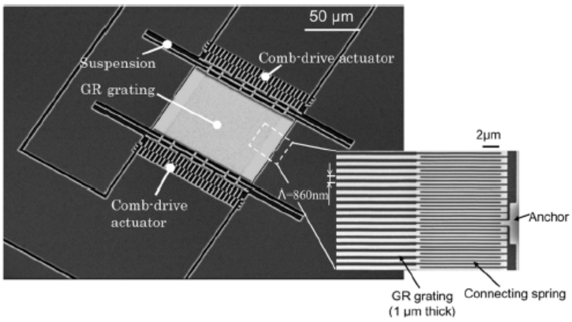

図１　サブ波長周期可変格子

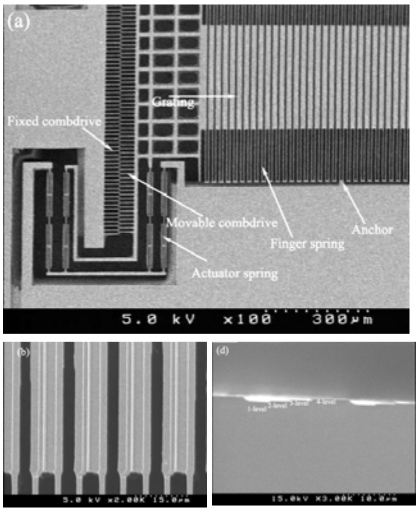

図２　周期可変ブレーズ格子

４．研究成果

シリコンを格子材料に用いて，くし型アクチュエータを組み込んだ周期可変光フィルタを設計製作した．格子周期をサブ波長レベルに小さくすることで，格子面を伝播する光波が格子構造と共鳴することにより，高い反射率の光応答が得られることを明らかにした．格子の周期を変えることで，特定の波長領域において反射率を可変にできることを見出した．材料屈折率が 2.5 以下において，格子周期の変化に比例する反射光波長変化が得られることを明らかにした．これにより狭帯域で可変範囲の広いフィルタが設計できることを示した．シリコン酸化膜の自立格子に関する最適設計では，帯域幅が 1nm 以下であるフィルタが得られることを示した．このようにサブ波長レベルの自立格子と MEMS

アクチュエータと組み合わせて周期可変フィルタを製作したのは，世界で初めての結果である．図１に製作結果の一例を示す．

一般的な回折格子において，高い回折効率を得るために，格子がブレーズ化される．本研究では周期可変のブレーズ格子を初めて製作した．図２に製作結果を示す．1.5μｍ帯域で高い回折効率を得た．

光路切り換えのためのマイクロミラーの角度センサを開発した．ミラー駆動と角度検出を同時に実現した．これにより，これまで，角度検出機能がないミラーを用いたスイッチの信頼性を向上できた．また，ミラーの低電圧駆動および温度無依存損の両立するための構造と製作方法を研究し，10V レベルの低電圧で温度依存の極めて少ない波長選択光スイッチを実現した．図３に構造と製作結果を示す．

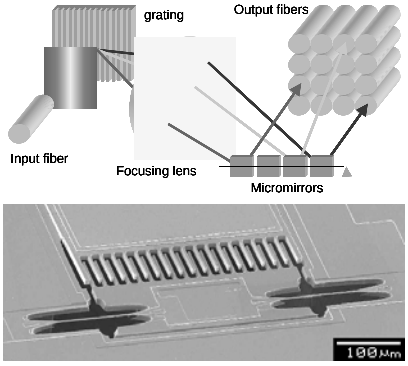

図３　低電圧温度無依存ミラースイッチ

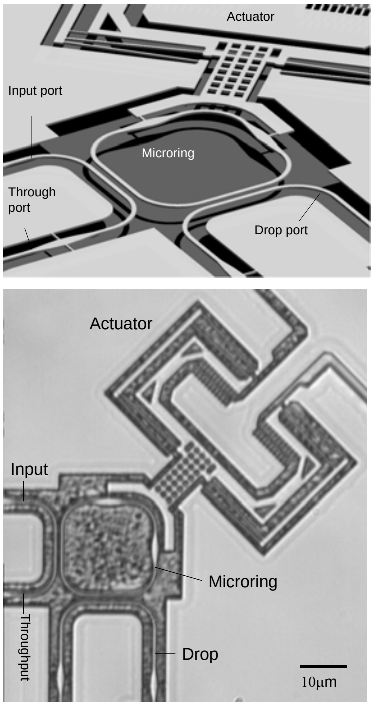

図４　結合率可変のマイクロリングフィルタ

シリコン細線導波路のマイクロリングに静電くしアクチュエータを接続し，結合率可変のアドドロップフィルタを製作した．構造の概略と製作結果を図４に示す．リングの周長は63μｍで，デバイス全体も極めて小型である．電圧の印加により，リングと導波路の結合がない状態から，臨界結合まで，変えることができ，波長選択ドロップフィルタの機能を実験的に示した．

以上の他にも，MEMS 技術によるマイクロアクチュエータを接続し，可変範囲の広いフィルタや光スイッチなどを製作し，動作を確認した．また，シリコン細線導波路やフォトニック結晶などの微細デバイスと MEMS アクチュエータを接続した機能性の高い他のタイプのフォトニックデバイスも試作できた．以上より本研究目的の大部分を達成できたと考えられる．

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 33 件）すべて査読有

[1]M.Sasaki, M. Tabata, K.Hane, “Driving of micromirror and simultaneous detection of rotation angle using integrated piezoresistive sentsor,” J. Opt. A: Pure Appl. Opt. vol. 11 (2009) in press

[2]Y.Wang, Y.Kanamori, K.Hane, “Pitch-variable blazed grating consisting of freestanding silicon beams,” Opt. Exp. vol. 17, pp.4419-4426 (2009)

[3]Y.Wang, Y.Kanamori, J.Ye, H.Sameshima, K.Hane, "Fabrication and characterization of nanoscale resonant gratings on thin silicon membrane," Opt. Exp. vol.17, pp. 4938-4943 (2009)

[4]Y.Wang, Y.Kanamori, T.Sasaki, K.Hane, “Design and fabrication of freestanding pitch-variable blazed grating on silicon-on-insulator wafer, “ J. Micromech. Microeng. vol. 19, pp. 025019 (7pp) (2009).

[5]K.Takanashi, E.Bulgan, Y.Kanamori, K.Hane, “Submicron comb-drive actuators fabricated on thin single crystalline silicon layer,” IEEE Trans. Industrial Electron. vol. 56 (2009) 991-995.

[6]K.Takahashi, Y.Kanamori, Y.Kokubun, K.Hane, “A wavelength-selective add-drop switch using silicon microring resonator with a submicron-comb electrostatic actuator,” Opt. Exp. vol. 16, pp. 14421-14428 (2008)

[7]Y.Kanamori, T.Kobayashi, K.Hane, “Fabrication of analog and desital-modulated pitch-variable gratings using silicon-insulator substrate,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 47, pp. 5274-5277 (2008)

[8]J.-S.Ye, Y.Kanamori, F.-R.Hu, K.Hane, “Parameter optimization of narrow bandstop optical filters using the self-suspended subwavelength grating for TE polarization,” J.

Mod. Opt. vol. 55, pp. 1519-1528　(2008)
[9]Y.Kanamori, K.Douzono, S.Fujihira, K.Hane, “Development of a compact hydrogen- annealing machine for surface transformation of silicon and its applications to micro-optical devices,” J. Vac. Sci. Technol. A, vol. 26, pp. 365-369 (2008)
[10]E.Bulgan, Y.Kanamori, K.Hane, “Submicron silicon waveguide optical switch driven by microelectromechanical actuator,” Appl. Phys. Lett. vol. 92, pp. 101110-1-3 (2008)
[11]E.Bulgan, Y.Kanamori, K.Hane, “Theoretical analysis of mechanical contact based submicron Si waveguide optical microswitch at telecommunication wavelength,” IEEJ Trans. SM, vol. 127, pp80-84 (2008)
[12]N.Matsuyama, Y.Kanamori, J.-S.Ye, K.Hane, “Micromachined surface emitting dye laser with a serf-suspended guided mode resonant grating,” J. Opt. A: Pure Appl. Opt. Vol. 9, pp. 940-944 (2007)
[13]V.K.Singh, M.Sasaki, K.Hane, “Angled exposure method for patterning on three-dimensional structures,” Jpn. J. Appl. Phys. vol. 46, pp. 6449-6453 (2007)
[14]H.Ju, T.Ohta, M.Ito, M.Sasaki, K.Hane, M.Hori, “Geometrical characteristics of silicon cavities etiched in EDP,” J. Micromech. Microeng., vol. 17, pp.1012-1016 (2007)
[15]Y.Kanamori, T.Kitani, K.Hane, “Out-of-plane motion of 260-nm thick guided-mode resonant grating filter controlled by four micro-thermal actuators,” Microsyst. Technol. vol. 13, pp. 867-872 (2007)
[16]M.Sasaki, S.Yuki, K.Hane, “Performance of tense thin-film torsion bar for large rotation and low-voltage driving of micromirror,” IEEE J. Selected Topics Quant. Electron., vol. 13, pp. 290-296 (2007)
[17]J.S.Ye, Y.Kanamori, F.-R.Hu, K.Hane, “Narrow-band tunable optical filters using the self-suspended subwavelength grating,” J. Mod. Opt. vol. 54, pp. 827-832 (2007)
[18]J.S.Ye, Y.Kanamori, F.-R.Hu, K.Hane, “Rigorous reflectance performance analysis of Si3N4 self-suspended subwavelength gratings,” Opt. Commun. vol. 270, pp. 233-237 (2007)
[19]Y.Kanamori, T.Kitani, K.Hane, “Control of guided resonance in a photonic crystal slab using microelectromechanical actuators,” Appl. Phys. Lett. vol. 90, pp. 031911-1-3 (2007)
[20]M.Ishimori, M.Sasaki, K.Hane, “Micromirror with two parallel rotation axes for external cavity diode laser,” IEICE Trans. Electron. vol. E90-C, pp. 72-77 (2007)
[21]M.Sasaki, M.Ishimori, J.-H.Song, K.Hane, “Tunable vertical comb for driving micromirror realized by bending drive wafer,” IEICE Trans. Electron. vol. E90-C, pp. 147-148 (2007)
[22]Y.Kanamori, M.Shimono, K.Hane, “Fabrication of transmission color filters using silicon subwavelength gratings on quartz substrates,” IEEE Photonics Technol. Lett. vol. 18, pp. 2126-2128 (2006)
[23]J.S.Ye, Y.Kanamori, F.-R.Hu, K.Hane, “Self-supported subwavelength gratings with a broad band of high reflectance analyzed by the rigorous coupled-wave method,” J. Mod. Opt. vol. 53, pp. 1995-2004 (2006)
[24]M.Sasaki, S.Yuki, K.Hane, “Large-rotation and low-voltage driving of micromirror realized by tense thin-film torsion bar,” IEEE Photonics Technol. Lett. vol. 18, pp. 1573-1575 (2006)
[25]M.Sasaki, T.Edwin, K.Hane, “Exposure method for three-dimensional samples using phase shift mask,” IEEJ Trans. SM, vol. 126, pp.241-242 (2006)
[26]M.Sasaki, F.Bono, K.Hane, “Electrostatic actuator with segmented comb electrodes,” IEEJ Trans. SM, vol. 126, pp.168-169 (2006)
[27]M.Sasaki, M.Tabata, T.Haga, and K.Hane, “Piezoresistive rotation angle sensor integrated in micromirror,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 45, pp. 3789-3793 (2006)
[28]K.Hane, T.Kobayashi, F.-R.Hu, Y.Kanamori, “Variable optical reflectance of a self-supported Si grating,” Appl. Phys. Lett. vol. 88, pp.141109-1-3 (2006)
[29]Y.Kanamori, T.Kitani, K.Hane, “Guided-mode resonant grating filter fabricated on silicon-on-insulator substrate,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 45, pp. 1883-1885 (2006)
[30]V.K.Singh, M.Sasaki, K.Hane, Y.Watanabe, H.Takamatsu, M.Kawakita, H.Hayashi, “Deposition of thin and uniform photoresist on three-dimensional structures using fast flow in spray coating,” J. Micromech. Microeng., vol. 15, pp. 2339-2345 (2005)
[31]T.Kobayashi, Y.Kanamori, K.Hane, “Surface emission from solid polymer dye in a guided mode resonant grating filter structure,” Appl. Phys. Lett., vol. 87, pp. 151106-1-3 (2005)
[32]H.Kumazaki, S.Inaba, K.Hane, Y.Nasu, “Three-dimensional micro-machining for fiber-type optical control devices,” IEEJ Trans. SM, vol. 125-E, pp. 211-215 (2005)
[33]V.K.Singh, M.Sasaki, J.-H.Song, K.Hane, “Technique for preparing defect-free spray coated resist-film on three-dimensional micro-electromecanical systems,” Jpn. J. Appl. Phys. vol. 44, pp. 2016-2020 (2005)

〔学会発表〕（計 23 件）
[1]Y.Kanamori, K.Takahashi, K.Hane, “Fabrication of variable drop filters with resonant

cavities in photonic crystals using thin comb-drive actuators," 21th Int. Microprocesses and Nanotechnology Conf. Fukuoka, Japan, 30C-10-4, (30 Oct. 2008)
[2]S.Haida, Y.Kanamori, K.Hane, "Silicon substrate with antireflection subwavelength gratings for optical communication devices fabricated with nano-particle masks," 21th Int. Microprocesses and Nanotechnology Conf. Fukuoka, Japan, 29D-9-45, (29 Oct. 2008)
[3]K.Takahashi, Y.Kanamori, K.Hane, "Silicon microring resonator connected with submicron comb actuator," Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotoincs, Freibrug, Germany, M3.2, (14 Aug. 2008)
[4]J.Ye, N.Matsuyama, Y.Kanamori, K.Hane, "Silicon Self-Suspended Resonant Grating Filters at Telecommunication Wavelength," CLEO 2008, San Jose, U.S.A., CTuNN2, (6 May 2008)
[5]K.Hane, J.-S.Ye, Y.Kanamori, "Subwavelength gratings combined with MEMS," The 14th Int. Display Workshops, Sapporo, Japan, MEMS4-1, (6 Dec. 2007)
[6]Y.Kanamori, T.Kobayashi, K.Hane, "Fabrication of pitch-variable MEMS gratings using thermal and electronic actuators," 2007 Int. Microprocesses and Nanotechnology Conf. Kyoto, Japan, 6A-4-158, (6 Nov. 2007)
[7]M.Sasaki, S.Yuki, K.Hane, "Performance of tense thin film torsion bar for large-rotation and low-voltage driving of micromirror," 2007 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials, Tsukuba, Japan, D-2-4, (18 Sept. 2007)
[8]M.Sasaki, M.Tabata, K.Hane, "Passivated piezoresistive rotation angle sensor integrated in micromirror," Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotoincs, Hualien, Taiwan, ThB2, (16 Aug. 2007)
[9]E.Bulgan, Y.Kanamori, K.Hane, "Mechanical-contact-based submicron- Si-waveguide optical microswitch at telecommunication wavelengths," Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotoincs, Hualien, Taiwan, TuP20, (14 Aug. 2007)
[10]M.Sasaki, T.Sasaki, K.Hane, H.Miura, "Optically flat micromirror using stretched membrane with crystallization-induced stress," Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotoincs, Hualien, Taiwan, MC3, (13 Aug. 2007)
[11]Y.Kanamori, N.Matsuyama, J.-S.Ye, K.Hane, "Self-supported pitch-variable guided-mode resonant grating filters at telecom wavelength," Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotoincs, Hualien, Taiwan, TuP23, (12 Aug. 2007)
[12]M.Sasaki, M.Tabata, K.Hane, "Driving of micromirror and simultaneous detection of rotation angle using integrated piezoresistive sensor," The 14th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Lyon France, 3EK9.P, (10 June 2007)
[13]J.-S.Ye, Y.Kanamori, F.-R.Hu, K.Hane, "Tunable optical filters with a nanostructured suspended grating," Int. Conf. on Nanoscience and Technology, Beijing, China, (4 June 2007)
[14]V.K.Singh, M.Sasaki, K.Hane, "Fiber-Bragg grating tuned by micro-heater array," 5th Int. Conf. on Optics-photonics Design and Fabrication, Nara, Japan, 7PD2-02 (7 Dec. 2006)
[15]J.-S.Ye, Y.Kanamori, F.-R.Hu, K.Hane, Tunable optical filters by using self-suspended subwavelength gratings," 5th Int. Conf. on Optics-photonics Design and Fabrication, Nara, Japan, 7S2-11 (7 Dec. 2006)
[16]K.Hane, F.-R.Hu, Y.Kanamori, "Photonic structure and materials combined with micro/nano-electro-mechanical systems," The 1st Int. Workshop on Functional Materials and The 3rd Int. Workshop on Nanophysics and nanotechnology, Halong, Vietnum, Pho-32-1, (7 Dec. 2006)
[17]K.Hane, "MEMS for subwavelength optics," The 6th US-Japan Joint Symposium on Nano systems, Tokyo, Japan, (11 Oct. 2006)
[18]Y.Kanamori, T.Kitani, K.Hane, Movable guided-mode resonant grating filters by four bimorph actuators for wavelength selective dynamic reflection control," IEEE/LEOS Int. Conf. on Optical MEMs and Their Application, Big Sky, U.S.A, TuC2, (22 Aug. 2006)
[19]K.Hane, "Optical MEMS and NEMS: Thin film micro/nano machining and integration," The 49th Society of Vacuum Coaters Tech. Conf., Washington, DC, U.S.A. Fall Bulletin, (25 Apr. 2006)
[20]K.Hane, M.Sasaki, Y.Kanamori, F.R.Hu, "Micro/nano opt-mechanical systems using silicon micromachining technology, " Nanoengineering Symposium 2005 , Daejeon, Korea, (28 Oct . 2005)
[21]M.Sasaki, M.Tabata, T.Haga and K.Hane, "Piezoresistive rotation angle sensor integrated in micromirror," Int. Conf. on Solid State Devices and Materials Kobe, Japan, D-1-2 (16 Sept. 2005)
[22]M.Sasaki, S.Yuuki, K.Hane, "Performance of tense thin film torsion bar for large-rotation and low-voltage driving of micromirror," IEEE/LEOS Int. Conf. on Optical MEMs and Their Application, Oulu, Finland, I2, (3 Aug. 2005)
[23]T.Kobayashi, Y.Kanamori, K.Hane, "A surface emitting solid polymer dye laser using a

guided mode resonant grating for bio-optical detections," IEEE/LEOS Int. Conf. on Optical MEMs and Their Application, Oulu, Finland, F5, (1 Aug. 2005)

〔産業財産権〕
○出願状況（計 5 件）

名称：光導波路デバイス装置及びその製造方法
発明者：羽根一博、金森義明
権利者：東北大学
種類：出願
番号：特願 2007-76749
出願年月日：2007 年 3 月 23 日
国内外の別：国内

名称：光フィルター装置及びその製造方法
発明者：金森義明、羽根一博
権利者：東北大学
種類：出願
番号：特願 2007-76748
出願年月日：2007 年 3 月 23 日
国内外の別：国内

名称：マイクロミラーデバイスとその製造方法，マイクロミラーデバイスの角度計測方法，およびマイクロミラーデバイス応用装置
発明者：佐々木実、羽根一博
権利者：東北大学
種類：出願
番号：特願 2005-219851
出願年月日：2005 年 7 月 29 日
国内外の別：国内

名称：レーザ共振器装置およびその製造方法
発明者：羽根一博、金森義明
権利者：東北大学
種類：出願
番号：特願 2005-185888
出願年月日：2005 年 6 月 27 日
国内外の別：国内

名称：サブ波長周期格子を用いたレーザ装置
発明者：羽根一博、金森義明
権利者：東北大学
種類：出願
番号：特願 2005-158129
出願年月日：2005 年 5 月 31 日
国内外の別：国内

〔その他〕
ホームページ
http://www.hane.mech.tohoku.ac.jp

６．研究組織
(1)研究代表者
羽根　一博（HANE KAZUHIRO）
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：50164893
(2)研究分担者
佐々木　実（SASAKI MINORU）
豊田工業大学・教授（平成 18 年まで東北大学・助教授）
研究者番号：70282100
金森　義明（KANAMORI YOSHIAKI）
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10333858