

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月11日現在

機関番号： 24402
 研究種目： 基盤研究(C)
 研究期間： 2010 ~ 2012
 課題番号： 22560042
 研究課題名(和文) セルフポンプ位相共役鏡半導体レーザの研究

研究課題名(英文) Study on self-pumped phase-conjugate mirror
 using broad-area semiconductor lasers

研究代表者

向井 孝彰 (MUKAI TAKAAKI)
 大阪市立大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：10419674

研究成果の概要(和文)：広ストライプ半導体レーザへの外部平面鏡からの斜め光フィードバック実験により、発生した位相共役光が光フィードバックの無い場合の光出力と弱め合う干渉をするため、光パワーが減少することを初めて見い出すと共に、外部鏡までの距離 L で決まる縦モード間隔周波数が通常の $c/2L$ ではなく、位相共役鏡共振器に特徴的な $c/4L$ であることを実測した。さらに発散鏡面波に対しても波面反転作用を有する位相共役鏡として機能することを実証した。

研究成果の概要(英文)：Angled optical feedback experiments in broad-area laser diodes (BA-LDs) reveal to decrease the light output due to the destructive interference between the generated phase conjugate wave and originally emitted light output from the BA-LD. Beat-note spectra of the cavity circulating light is found to be the half-axial mode spaced at frequencies of $c/4L$. These observations give a direct evidence for the construction of the self-pumped phase conjugate mirror. The self-pumped phase conjugate mirror is also successfully demonstrated for the divergent spherical wave having the wavefront reversal feature.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：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：位相共役、セルフポンプ位相共役鏡、広ストライプ半導体レーザ、ブロードエリア半導体レーザ、位相共役光共振器、発振線幅、半導体増幅媒質

1. 研究開始当初の背景

(1) 位相共役鏡の応答速度と発振線幅

位相共役配置の縮退四光波混合は、位相補正作用を有する位相共役鏡を実現する基本過程として広く研究されてきたが、一般に非線形光学定数が小さいため、大きな光強度を

実現できるパルス動作が主流であった。CW動作の位相共役鏡は BaTiO_3 のようなキャリア移動を伴うフォトリフレクティブ(光誘起屈折率効果)材料で実現されてはいたが、この非線形材料の応答時間は数秒程度と非常に遅く、これより高速の位相補正作用を行うの

は困難であった。一方、サブナノ秒の高速で応答する半導体増幅媒質は、高利得性の故に高効率な非線形材料であり、広ストライプ半導体レーザ増幅媒質中で反射率が1を超えるセルフポンプ形の位相共役鏡を実現できれば、外部の平面鏡との間でレーザ発振が生じることが報告されている[1]。

文献[1]の実験結果では、出力ビーム方向へのレーザ発振が報告されているのみであり、位相共役鏡としての特性は明らかにされていない。このセルフポンプ形のレーザは位相共役鏡の作用により温度や光学アライメントの変化に対しても安定であるばかりでなく、サブナノ秒の高速応答性を活かして発振線幅の大幅な狭窄化が可能になると期待している。これは、サブナノ秒で応答する半導体増幅媒質で位相共役鏡を構成すれば、数GHzまでの帯域内で周波数雑音が抑圧され、輝線スペクトルに近い発振線幅を持つ高性能半導体レーザを実現できるのではないかと着想したためである。実際、瞬時に応答する位相共役鏡でフィードバックされた半導体レーザでは、これが可能となることが理論解析により示されている[2]。

(2) 光非線形材料としての半導体増幅媒質

半導体光増幅器[3]に代表される半導体増幅媒質は、注入電流による高効率ポンピング、高利得性に加えて、光非線形媒質としても非常に高効率である[4][5]。例えば、単一モード導波路構造の半導体光増幅器 (Semiconductor Optical Amplifier: SOA) にその光周波数が数GHz程度異なる2光波を注入すると、2光波の差周波数だけ異なった新たな第3の光波が発生する。これは差周波数で脈動するキャリアビート (動的回折格子) で入力光が回折された結果、新たな光波が発生する光周波数 (波長) 変換動作であり、近縮退四光波混合 (NDFWM) と呼ばれ、申請者が実験的に初めて見出したものである[6][7]。一方、高出力を得るための広ストライプ半導体レーザ (LD) では、同一光周波数の対向するポンプ波に小さな角度で第3のプローブ光を入射させると、プローブ光とは逆方向に進む第4の光波が発生し、これはプローブ光の位相共役波となっている。申請者は、この位相共役鏡の反射率が100%を超える利得を持つことを実証する[8]と共に、外部ポンプ光を有する位相共役鏡からファブリペロLDに位相共役フィードバックを行い、その発振線幅が外部ポンプ光の線幅で決まることを実証してきた[9]。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ナノ秒以下の高速に応答する半導体増幅媒質のみからなるセルフポンプ (自己励起形) 位相共役鏡共振器でレー

ザ発振を実現し、その動作機構を明らかにして高効率化を図ると共に、位相共役鏡の特徴である発振周波数の長期安定性と狭い発振線幅を実験的に検証することである。特に、高速応答の位相共役鏡でしか実現できない輝線スペクトルに近い狭発振線幅を実験的に検証できれば、半導体レーザにとって革命的な性能改善であるため、実用上のインパクトは計り知れない。

3. 研究の方法

本研究でその自励発振を目指すセルフポンプ形の位相共役鏡の構成原理図[1]を図1に示す。裏面に高反射率コートを、前面に低反射率コートを施した広ストライプ半導体レーザ (broad-area laser diode: BA-LD) の前面斜め方向に外部平面鏡を設置し、BA-LD内にキャリア密度の空間的回折格子を形成することにより、図1の基本構成はセルフポンプの位相共役鏡として機能する。ここでは、外部からポンプ光が与えられず、位相共役共振器内で立ち上がってくる光がポンプ光として動作することになる。これは、図2(b)に示した一般的な位相共役配置の縮退四光波混合実験においては、外部から供給される対向する2つのポンプ光が不可欠であることと際立った対照をなしている。

本研究では、主として共振器長 $250\mu\text{m}$ 、ストライプ幅 $50\mu\text{m}$ 、裏面反射率 95%、前面反射率 15% を持つ AlGaAs-BA-LD (動作波長 825nm 付近) を、位相共役鏡として機能させるため

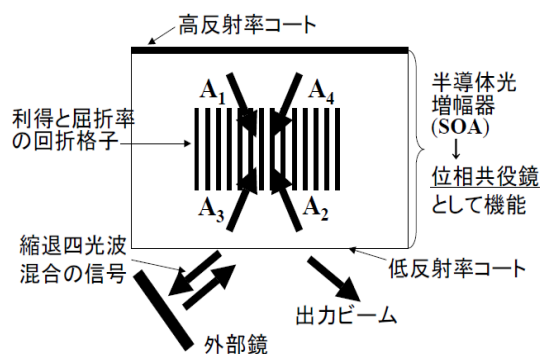


図1. セルフポンプ位相共役鏡半導体レーザ

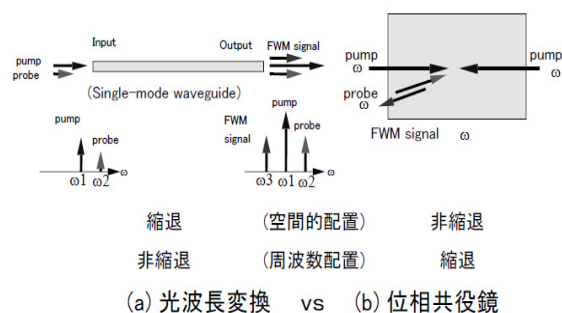


図2. 半導体増幅媒質における光非線形動作

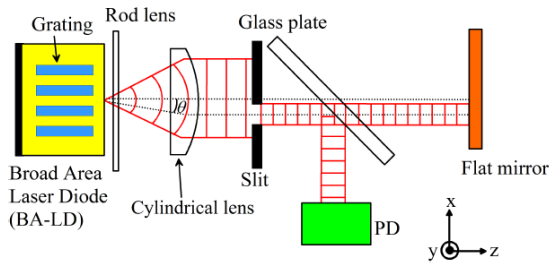


図 3. 平行平面波のフィードバック実験系

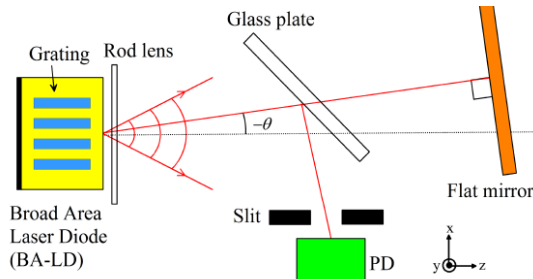


図 4. 発散球面波のフィードバック実験系

の半導体増幅媒質として用いた。図 1 の光学配置を光学定盤上で実現するために、以下の 2 つの光学実験系を構築して、実験を行った。

(1) 1 つ目は、図 3 に示す平行平面波による光フィードバック実験系である。ここでは、BA-LD の出力光を活性層に平行方向に設置したロッドレンズにより垂直 (y) 方向の広がりを抑え、シート状の光とした上で、LD 端面から焦点距離の位置に設置した円柱レンズにより水平面内の発散球面波を平行平面波に変換している。さらに、その後方に設置したスリットの x 方向位置によって選択した θ の角度成分のみの光を、外部平面鏡でフィードバックしている。

(2) 2 つ目は、図 3 から円柱レンズを取り除いた図 4 に示すような、水平面内での一次元発散球面波をそのまま用いた光フィードバック実験系である。

4. 研究成果

(1) 図 3 の平行平面波実験系において、平面反射鏡の前面に光チョップを挿入し、光検出器出力をロックイン検出した場合のフィードバック角度 θ 依存性を図 5 に示す。この測定では、ロックイン検出位相を $\theta = 0^\circ$ で最大出力が得られる条件に固定した上で、 θ を変化させており、 $\theta = \pm 4^\circ$ 付近に大きな負符号のピークが観測された。この $\theta = \pm 4^\circ$ 付近に現れた負符号の信号は、光フィードバックがあることにより光出力が減少することを示唆している [10] [11]。なお、この負符号信号の角度幅 (FWHM) は約 1° であり、これは BA-LD のファブリ・ペロ斜め共振特性によって支配されている。

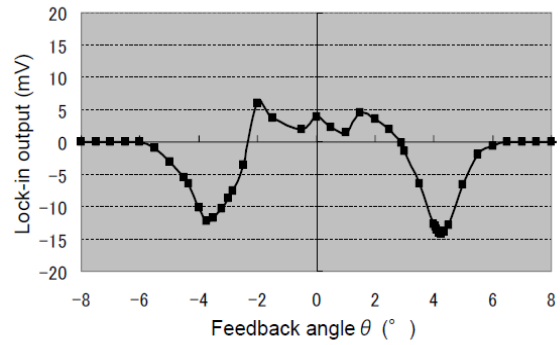


図 5. ロックイン出力の角度 θ 依存性

(2) 図 3 の平行平面波実験系で観測した、 $\theta = 0^\circ$ および $\theta = 4^\circ$ の光フィードバックの有無による CW 動作時の光出力対注入電流特性を図 6 (a) と図 6 (b) に示す。△印は光フィードバックが無い場合の、●印は光フィードバックが有る場合の光出力の実験結果である。図 6 (a) は通常の $\theta = 0^\circ$ の垂直フィードバック (A) によりしきい値電流が減少し、一定電流値での光出力が増加することを示している。一方、 $\theta = 4^\circ$ の斜め光フィードバック (B) ではしきい値電流は変化しないが、逆に、光パワーが減少することを初めて明らかにした。これは、斜め光フィードバックによって位相が反転した位相共役波が発生し、これがフィードバックの無い場合の光出力に destructive に干渉するために光出力の低下が観測されたものである [10] [11]。フィードバック光入力に対して発生する位相共役光出力の比として定義される位相共役反射率 R_{pc} の値として、30~40%程度を実測している。また、この位相共役波発生に伴う共振器内光強度の減少分が、図 1 の出力ビームパワーの増加分として外部に取り出されていることを、実験により確認している [12]。

(3) 図 3 の平行平面波実験系で Si-APD と RF スペクトルアナライザーを用いて、外部共振器長 $L=75\text{cm}$ の共振器内を周回する光のビートスペクトルを観測した。図 7 (a) と図 7 (b) に、 $\theta = 0^\circ$ および $\theta = 4^\circ$ の光フィードバック下でのビートスペクトルの観測結果を示す。図 7 (a) の水平矢印は縦モード間隔周波数が通常ミラー共振器の $c/2L$ で決まる 200 MHz であるのに対し、斜め光フィードバック実験では図 7 (b) に示す半分の 100 MHz が観測された。これは、位相共役共振器内では光が 2 往復して初めて元の位相に戻ることに伴って、通常の半分の縦モード間隔周波数 ($=c/4L$) が現れる [13] [14] ことを、セルフポンプの半導体増幅媒質の実験で初めて検証したものである [11]。

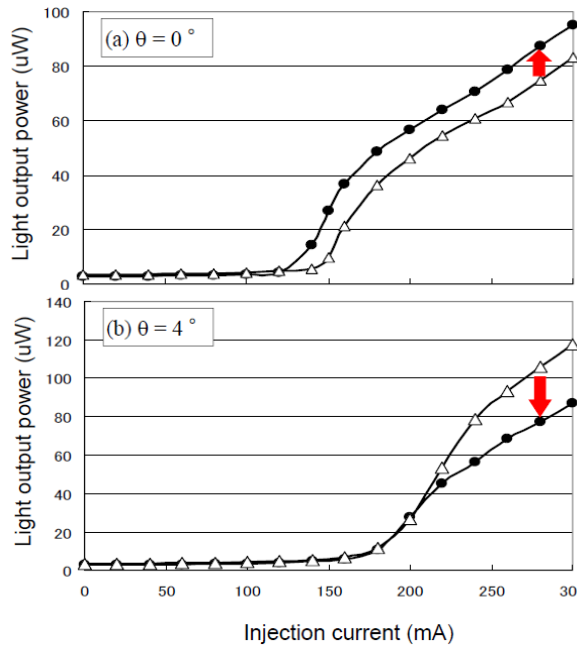


図6. 光フィードバック角度による光出力の増減

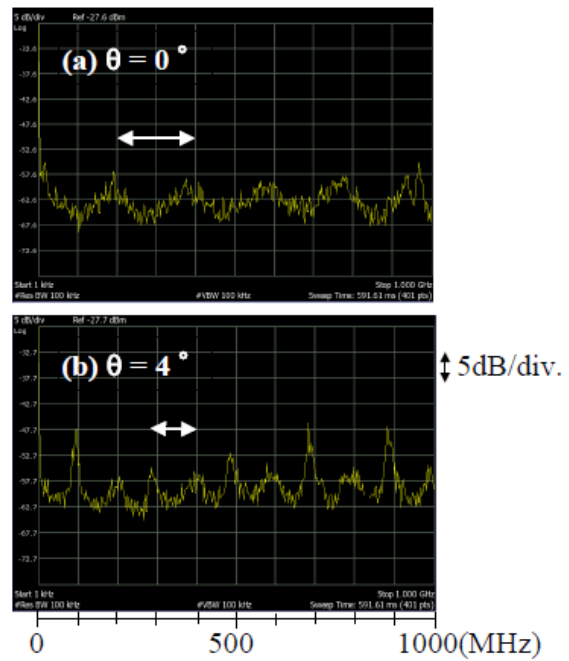


図7. 縦モードモード間隔周波数の変化

(4) 上記、(2)(3)の実験結果は、斜め光フィードバックの実験系で位相共役光が発生し、セルフポンプ位相共役鏡として機能していることを、異なる2つのアプローチで検証することに初めて成功したものである。

(5) 図4の発散球面波実験系で、BA-LDから5cmの位置に平面鏡を設置し、 $\theta = 0^\circ$ 、 -4° において、フィードバックの有る場合と無い場合の光出力対注入電流特性を測定した。 $\theta = 0^\circ$ の垂直フィードバック(A)では、波面が広がり続ける発散球面波のために光フィードバック効率が激減したのに対し、 $\theta = -4^\circ$ の斜め光フィードバック(B)では、発散球面波を用いているにもかかわらず、平行平面波を用いた実験(図6(b))と同程度の位相共役波の発生に伴う光出力の減少を確認し、光フィードバック効率、すなわち、位相共役反射率として、平行平面波の場合と遜色の無い30~40%程度の値を実現することに成功した。これは、発散球面波が位相共役鏡で反射された後に収束球面波として厳密に入射光の経路を逆向きにたどるという位相共役鏡に特徴的な「波面の反転作用」を直接実証したものである[15]。

(6) 発散球面波フィードバックの共振器間隔Lの増大および光減衰量の増加によりフィードバック光パワーが減少すると、位相共役反射率 R_{PC} がフィードバック光パワーに比例して減少することを、図8で実証している[15]。逆に、共振器間隔Lの短縮化を通じてフィードバック光パワーを増加させることにより、BA-LD 活性層中に形成されるキャリ

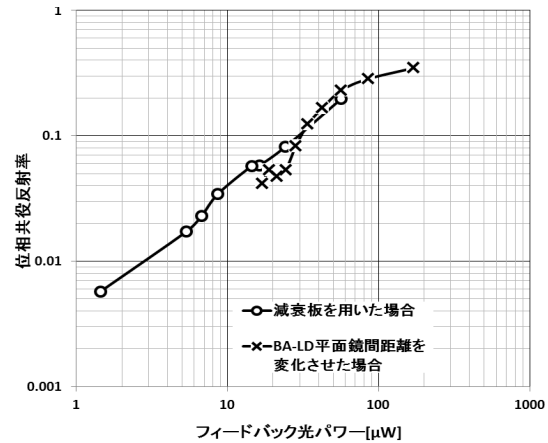


図8. R_{PC} のフィードバックパワー依存性

ア密度の空間的回折格子の強度が増加するため、 R_{PC} の増大に直結することが期待できる。

(7) 通常、BA-LDは双峰性の出力光角度分布を持つが、今回は図9に示すような、出力光が左右に分かれず、一方に偏っている単峰性出力のBA-LDを用いて実験を行った。その

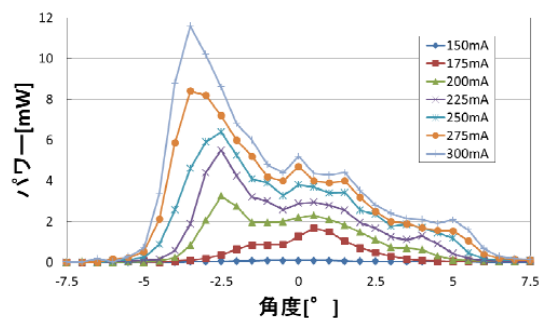


図9. 単峰性出力(角度スペクトル分布)

結果、光フィードバックを行う $\theta = -4^\circ$ 付近では通常の約2倍の光出力が得られた。このBA-LDを用いて、図3の実験系で斜め光フィードバックによる位相共役光発生実験を行った。実験系では焦点距離5cmのシリンドリカルレンズを用いた。光フィードバックの有無によるI-L特性の違いを図10に示す。斜め光フィードバックによるパワー減少量とフィードバックが無い場合のパワーとの比で表される位相共役反射率 R_{PC} は非常に高く、 $I=300\text{mA}$ では80%の値が得られている。

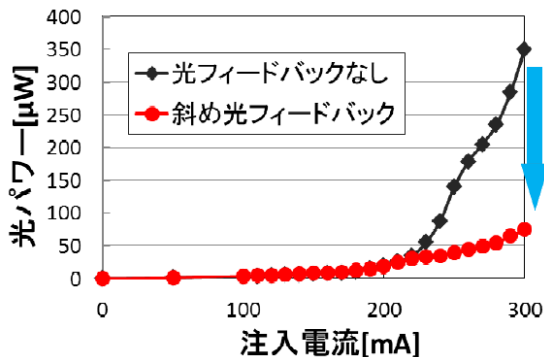


図10. 斜め光フィードバックによる光出力減少

この実験結果は、(6)の結果と共に、光フィードバックされる角度スペクトル光量の増大が、半導体増幅媒質中に形成されるキャリア密度の空間的回折格子強度の増大に直結しており、位相共役反射率の向上に効果的であることを直接的に検証したものとなっている。

【参考文献】

[1] P. M. Petersen, E. Samsøe, S. B. Jensen, and P. E. Andersen, "Guiding of laser modes based on self-pumped four-wave mixing in a semiconductor amplifier," *Opt. Express*, Vol. 13, pp. 3340-3347, 2005.

[2] L. Petersen, U. Gliese, and T. N. Nielsen, "Phase Noise Reduction by Self-Phase Locking in Semiconductor Lasers Using Phase Conjugate Feedback," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 30, pp. 2526-2533, 1994.

[3] T. Saitoh and T. Mukai, "1.5 μm GaInAsP Traveling-Wave Laser Amplifier," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. QE-23, No. 6, pp. 1010-1020, June 1987.

[4] T. Saitoh and T. Mukai, "Recent Progress in Semiconductor Laser Amplifiers

(invited)," *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 6, No. 11, pp. 1656-1664, November 1988.

[5] T. Mukai and T. Saitoh, "Nonlinear Phenomena in Traveling-Wave Semiconductor Laser Amplifiers," *Trans. IEICE*, Vol. E73, No. 1, pp. 46-52, January 1990.

[6] K. Inoue, T. Mukai, and T. Saitoh, "Nearly Degenerate Four-Wave Mixing in a Traveling-Wave Semiconductor Laser Amplifier," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 51, pp. 1051-1053, 1987.

[7] T. Mukai and T. Saitoh, "Detuning Characteristics and Conversion Efficiency of Nearly Degenerate Four-Wave Mixing in a 1.5 μm Traveling-Wave Semiconductor Laser Amplifier," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 26, pp. 865-875, 1990.

[8] P. Kuerz, R. Nagar, and T. Mukai, "Highly Efficient Phase Conjugation Using Spatially Non-degenerate Four-Wave Mixing in a Broad-Area Laser Diode," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 68, pp. 1180-1182, 1996.

[9] P. Kuerz and T. Mukai, "Frequency Stabilization of a Semiconductor Laser by External Phase-Conjugate Feedback," *Opt. Lett.*, Vol. 21, pp. 1369-1371, 1996.

[10] K. Hara, M. Inoue, D. Miyazaki and T. Mukai, "Phase conjugate wave generation based on self-pumped four-wave mixing in a broad-area laser diode," 22nd IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC2010), September 26-30, 2010, Kyoto Japan, Paper: P31.

[11] T. Mukai, K. Hara, M. Inoue, S. Nagiyama, and D. Miyazaki, "Self-Pumped Phase Conjugate Mirror Using a Broad-Area Laser Diode", *Int. Quantum Electronics Conference/ Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (IQEC/CLEO Pacific Rim 2011)*, August 28-September 1, 2011, Sydney, Australia, Paper:3230-CT-6.

[12] 岩崎直紀, 井上 誠, 山口和真, 宮崎大介, 向井孝彰, 「位相共役光発生に伴う共振器内光強度の減少と光出力の増大」, 第59回応用物理学関係連合講演会, 16p-F3-8, 2012年3月15日~3月18日.

[13] J. AuYeung, D. Feketa, D. M. Pepper, and A. Yariv, "Theoretical and Experimental Investigation of the Modes

of Optical Resonators with Phase-Conjugate Mirrors,” IEEE J. Quantum Electron., Vol. QE-15, pp. 1180-1188, 1979.

[14] R. C. Lind and D. G. Steel, “Demonstration of the longitudinal modes and aberration-correction properties of a continuous-wave dye laser with a phase-conjugate mirror,” Opt. Lett., Vol. 6, pp. 554-556, 1981.

[15] 覺野重誠, 向井孝彰, 岩崎直紀, 井上 誠, 宮崎大介, 「発散球面波を用いたセルフポンプ位相共役鏡」, 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 29p-B4-15, 2013 年 3 月 27 日～3 月 30 日.

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)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 覺野重誠, 向井孝彰, 岩崎直紀, 井上 誠, 宮崎大介, 「発散球面波を用いたセルフポンプ位相共役鏡」, 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 29p-B4-15, 2013 年 3 月 27 日～3 月 30 日, 神奈川工科大学、神奈川県厚木市.
- ② 岩崎直紀, 井上 誠, 山口和真, 宮崎大介, 向井孝彰, 「位相共役光発生に伴う共振器内光強度の減少と光出力の増大」, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 16p-F3-8, 2012 年 3 月 15 日～3 月 18 日、早稲田大学, 東京都新宿区.
- ③ T. Mukai, K. Hara, M. Inoue, S. Nagiyama, and D. Miyazaki, “Self-Pumped Phase Conjugate Mirror Using a Broad-Area Laser Diode”, Int. Quantum Electronics Conference/Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (IQEC/CLEO Pacific Rim 2011), August 28-September 1, 2011, Sydney, Australia, Paper: 3230-CT-6.
- ④ K. Hara, M. Inoue, D. Miyazaki and T. Mukai, “Phase conjugate wave generation based on self-pumped four-wave mixing in a broad-area laser diode,” 22nd IEEE International Semiconductor Laser Conference, (ISLC2010), September 26-30, 2010, Kyoto Japan, Paper: P31.

[図書] (計 2 件)

- ① 向井孝彰, ” 第 8 章 光通信の基礎技術 (3) ～レーザ光源 (pp. 98-112)” 【分

担執筆】,” 第 9 章 光通信の基礎技術 (4) ～光増幅 (pp. 113-133)” 【分担執筆】 in 「OHM 大学テキスト 光通信工学」(北山研一 編著), オーム社(2012 年 12 月)

- ② 向井孝彰, ” 第 8 章 反射防止コート技術 (pp. 184-191)” 【分担執筆】 in 「光デバイスにおける接着剤と接着技術」(三田地成幸、村田則夫 監修), シーエムシー出版 (2010 年 10 月).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

向井 孝彰 (MUKAI TAKAAKI)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：10419674

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし