

第7章 結論

本研究の目的は、現在の光ファイバによる通信速度のボトルネックとなりつつある、OEO 変換に基づいたルーターの代わりとなる、全光ルーターの実現へ向けた全光フリップ・フロップの開発である。これまで様々な方式の全光フリップ・フロップが提案されてきたが、その中でも MMI-BLD は高速動作、高い ON/OFF 比などの利点がある。しかし、これまでの MMI-BLD は反射鏡としてへき開端面をそのまま用いた Fabry-Pérot 型の共振器であり、発振スペクトルの線幅が広く WDM 用途に向かない、へき開する必要があるため他の導波路型光デバイスとモノリシックに集積できない、などの欠点があった。そこで、反射鏡として DBR を用いることによって単一モード発振を実現し、WDM 用途に適応できる狭い線幅を得、動作の安定化を図り、他の導波路型光デバイスとモノリシックに集積可能な DBR-MMI-BLD の実現を目指してきた。

第3章ではその DBR-MMI-BLD を作製するためのプロセス手法について説明した。これは InP クラッド層の MOVPE 再成長を境に大きく2つに分けることができる。前半は Offset quantum well 手法による Active / passive 領域の集積であり、DBR 回折格子の作製もここに含まれる。後半はウェットエッチングによるリッジレーザの作製である。今回は SiO_2 を絶縁膜として用い、導波路と電極のコンタクト部はフォトリソグラフィを行って開けてある。

第4章では、DBR-MMI-BLD 作製の予備実験として行った、Offset quantum well による Active / passive 集積の検証について示した。ここでは単純な Fabry-Pérot レーザーを元に、その共振器の全体・一部にのみ Active 領域があるようなレーザを作製した。発振前 ASE スペクトルのフーリエ変換による分析から、Offset quantum well 手法を用いて反射の無い Active / passive 界面が得られていることが分かった。また、Active 領域を2つに分けることにより双安定レーザ-BLD の作製にも成功し、過飽和吸収体 SA の長さが長くなるにつれて L-I 特性中のヒステリシスの増大を確認した。

第5章では、作製した DBR-MMI-BLD 単体での動作を説明した。まずデバイスに電流を注入し、しきい値 167 mA で発振を始め、L-I 特性中には幅約 5 mA のヒステリシスを得た。また発振スペクトルを見ると単一モードで発振しており、発振波長は 15553.9 nm、164 mA の注入電流での ON/OFF 比は 26 dB、SMSR は 23 dB であった。デバイスに両側から CW 光を入射することにより静的な SET / RESET 動作を示し、その動作可能波長範囲は 1520～1570 nm であった。

さらに LN 変調器で 10 ns 幅の光パルスを変調し、160 ns 間隔でデバイスに両側からセット・リセット光として入射し、動的にフリップ・フロップ動作を実証した。最速で立ち上がり時間は 320 ps、立ち下がり時間は 200 ps 程度であり、動的な ON/OFF 比は EDFA による OSNR の劣化が加わり 16 dB であった。また、この動作可能波長範囲は 1535～1570 nm であった。立ち上がり時間について

ては Critical slow down が確認され、光パルスの強度が弱いと劇的に立ち上がり時間が遅くなること、また光パルスの強度が強すぎるとキャリアが回復するまでに時間がかかり立ち上がりに遅れがでることが分かった。立ち上がり時の緩和振動周波数は 0.7 GHz であり、強パルス時にはこの周波数で律速されるため、共振器長を短くすることによってさらなる高速化を目指す。逆に立ち下がり時間については光パルスの強度に応じて早くなる結果を得た。

第 6 章では、この DBR-MMI-BLD をラベル・メモリとして用いパケット・スイッチングをした結果について示した。デバイスは第 5 章で述べた通り 160 ns 間隔でくるパルスを元に SET / RESET を繰り返し、その光出力を MZI-SOA 全光スイッチに入れることにより、10 Gb/s $2^{31}-1$ PRBS のパケットをスイッチした。MZI-SOA 通過後の光パケットにも明瞭なアイが確認でき、ビットエラーレート 10^{-11} を達成した。この際エラーフロアは見られず、BER 10^{-9} でのパワーペナルティは 1.8 dB であった。

さらに、ここに 1 波～8 波 DWDM 信号を 40 Gb/s で変調したパケット(データレート 40～320 Gb/s)を入射し、パケット・スイッチング動作を示した。これも DBR-MMI-BLD の出力を元に MZI-SOA でスイッチでき、8 波においてはエラーフロアが見られたものの、全変調方式全チャネルにおいて 10^{-9} のエラーレートを達成した。BER 10^{-9} のパワーペナルティは 1 波、2 波、4 波、8 波のそれぞれにおいて 1.5, 2.5, 4.0, 7.0 dB であった。このことから、DBR-MMI-BLD によるフリップ・フロップと MZI-SOA によるスイッチの組み合わせが変調方式に対して高い透明性を持つことを示すことができた。

本論文において、DBR-MMI-BLD が MMI-BLD の利点を受け継ぎつつさらに高性能な素子であることを示すことができた。単一モード発振や、モノリシック集積が可能であることに加えて、入力波長に対するトレランスが大きく動的動作においても幅広い波長帯で動作させることができた。またこの出力を用いてパケット・スイッチング動作も実証することができ、DBR-MMI-BLD は将来作製されるであろう全光ルーターにおいて、光メモリとして使えうることを示すことができた。

Appendix A マスクデザイン

DBR-MMI-BLD を作製するためのフォトマスクデザインについて述べる。このデバイスはフォトマスクを 4 枚必要とする。ただし、導波路の頭を開け電極とコンタクトをとるためのマスクは、導波路マスクとほぼ同じデザインであり、見づらくなるため載せていない。また DBR のための EB 描画用パターンも煩雑になり、DBR の電極に隠れてしまうため載せていない。

測定用の 1 連のサンプル(バーと呼ぶ)のフォトマスクデザインを Fig. A1 に示す。導波路パターンは黒の塗りつぶし、電極パターンは緑の塗りつぶし、また Active / passive 集積のためのパターンは赤のマスキングで表示してある。Active / passive 集積のためのマスクは、実際には Passive となる部分を塗ってある。このように、MMI の長さ、SA の長さを振りながら 10 個のデバイスをまとめて取り出せるようにしてある。MMI の長さは 560, 585, 610, 635, 660 μm の 5 種類であり、SA の長さは 25, 50, 75, 100 μm の 4 種類を用意してある。

4 つ並んで見える電極パターンの両側から斜めに導波路が見える。この角度が 7° に設定してあり、そこまで曲げながら導波路幅を 2 μm から 5 μm まで広げてある。図中両端に見える細い縦の電極パターンを基準にへき開する。

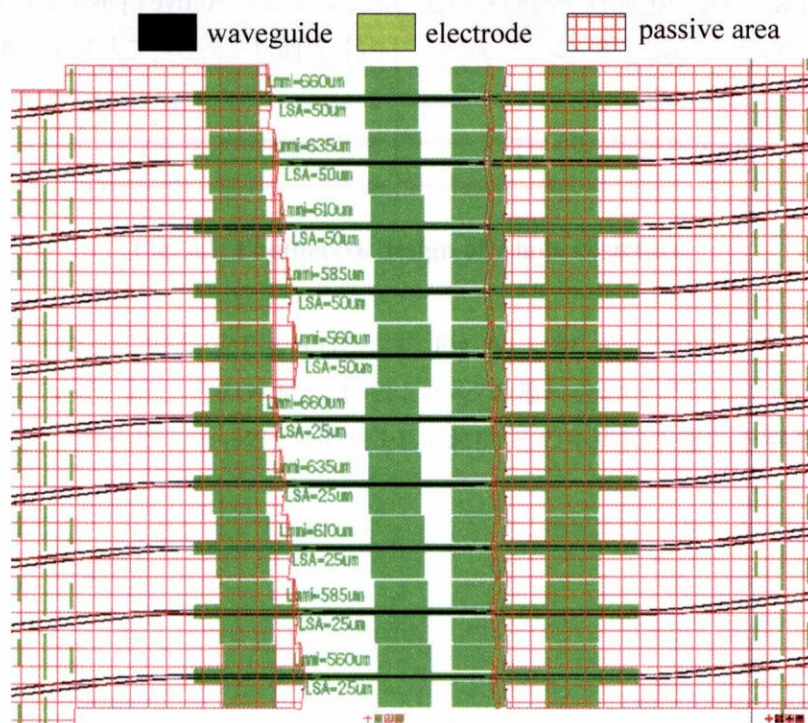


Fig. A1: Photomask design of DBR-MMI-BLD at one bar.

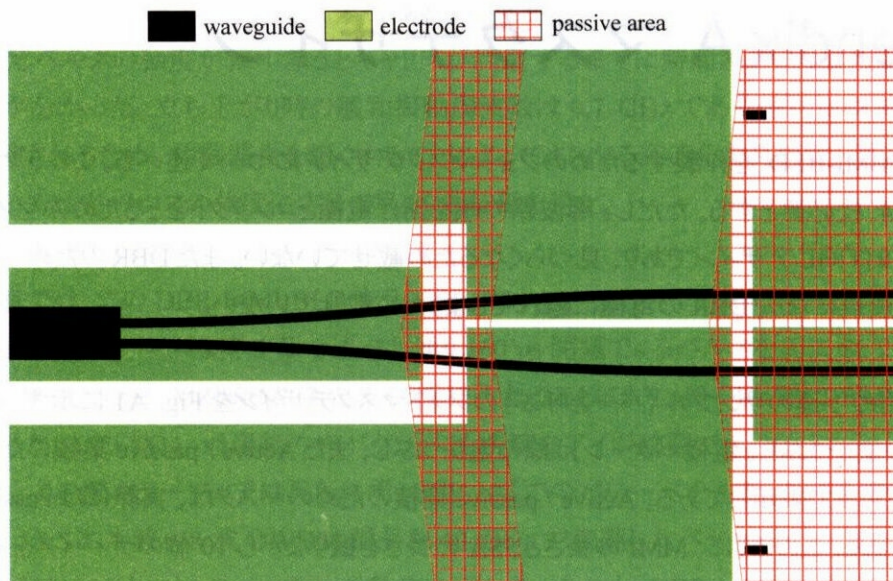


Fig. A2: Photomask design of DBR-MMI-BLD at MMI output port and SA.

次に、MMIの出口部分の拡大図を Fig. A2 に示す。MMIの幅は全て $12\text{ }\mu\text{m}$ であり、MMIの2つの出力ポートは曲げ導波路を用いて $25\text{ }\mu\text{m}$ まで広げてある。またこの曲げ導波路の曲率半径は $1000\text{ }\mu\text{m}$ である。この中央左の電極が MMI に電流を注入するためのもので、中央上下に伸びている部分が SA の電極である。右側には DBR の電極がある。MMI と SA の間には狭い Passive 領域があり、MMI と SA の絶縁性を高めている。また、いずれの Active / passive 界面も導波路に対して垂直にはならないようにデザインしてあり(ここでは 7° 傾けてある)、これにより Active / passive 界面での反射を下げています。

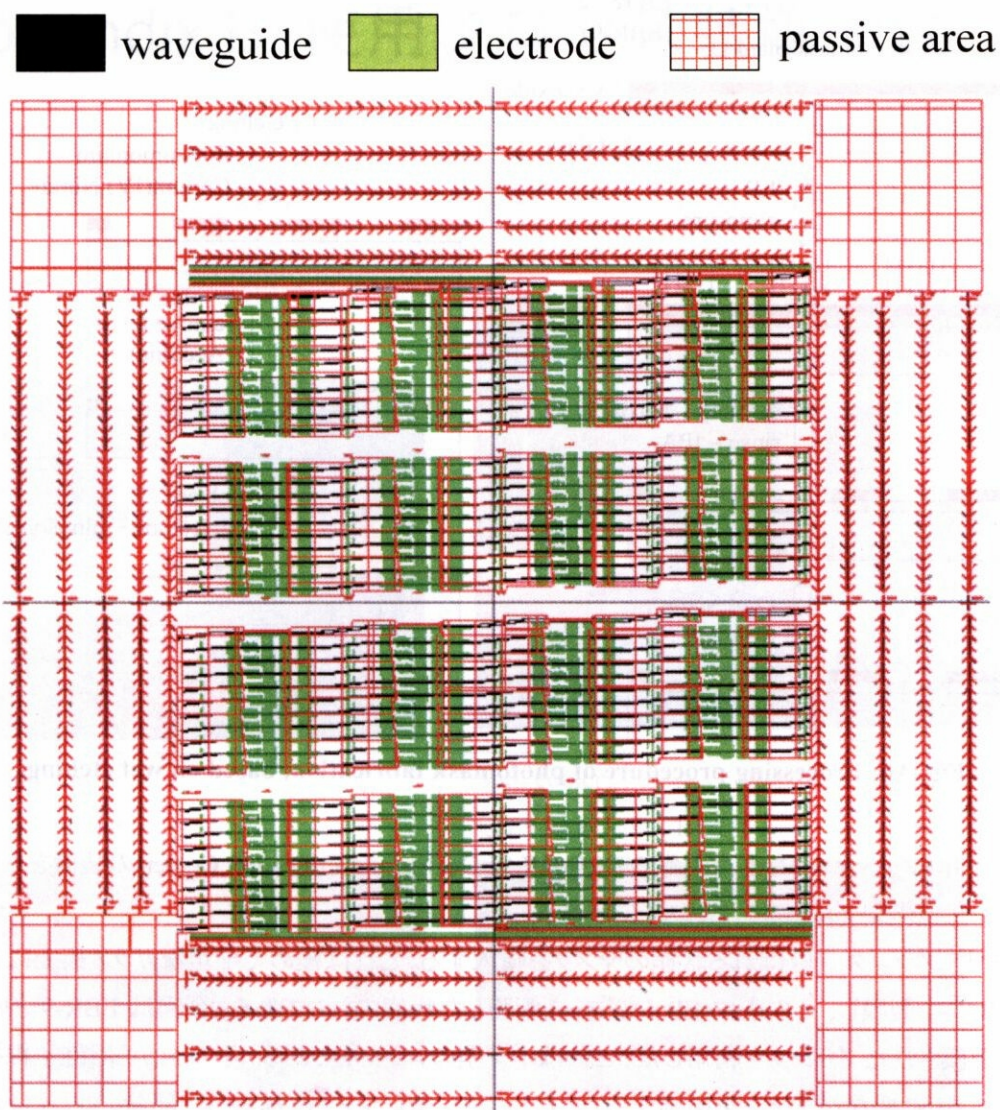


Fig. A3: Photomask design of whole structure.

全体のフォトマスクデザインをFig. A3に示す。Fig. A1で示した1つのバーを上下左右に 4×4 の16個配置している。また、その外側にはフォトマスクの重ね合わせアライメントをとるためのマークを配置している。アライメントマークは矢羽状をしており、その中央に3重の十字が切ってある。

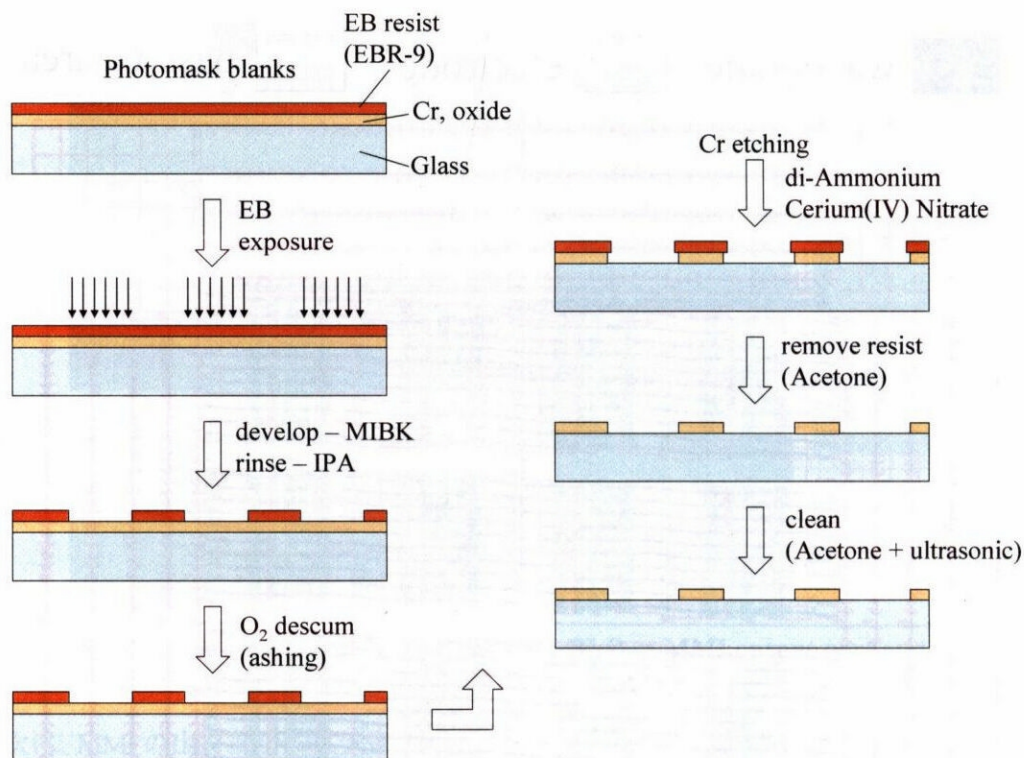


Fig. A4: Processing procedure of photomask fabrication, based on wet etching.

今回はフォトマスクを東京大学 VDEC (VLSI Design and Education Center)の装置を用いて作製した。その作製プロセスを Fig. A4 に示す。

まず「ブランク」と呼ばれる状態のマスクを購入する。これは極めて平坦なガラス板上にクロムと酸化クロムを製膜し、その上に EB レジストを製膜した状態のものである。今回は EBR-9 というレジストが製膜されたブランクを利用した。これはポジ型のレジストである。その上から、電子線描画装置を用いて必要なパターンを描画する。ただし、ポジ型レジストは描画した部分のレジストが現像時に無くなるため、例えば導波路パターンのマスクが必要な場合は導波路が無い部分を全て塗りつぶす必要がある。今回はショットで露光ができる ADVANTEST 社製 F5112 を用いている。

その後、MIBK (メチルイソブチルケトン)を用いて現像し、130°C で 20~30 分ベークする。MIBK の洗浄は IPA (イソプロパノール)で行う。現像が終わって酸化クロム面が出た状態だが、わずかに残っているレジストを除去するのと、レジスト端の平坦化のために、15 秒だけ酸素プラズマでアッシングし、全体のレジストをわずかに除去する。そうして完全に酸化クロム面が出た状態で、硝酸第二セリウムアンモニウムを用いて、酸化クロムとクロムの層をウェットエッチングし除去する。

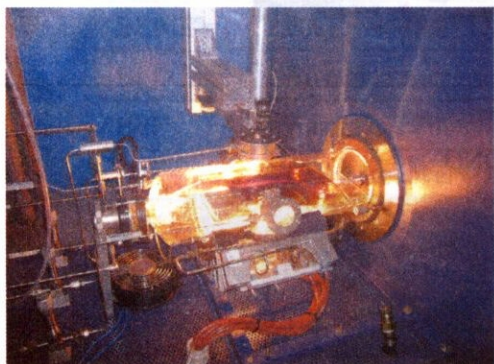
うまくパターンが描画・現像・エッチングできていたら、最後にレジストを除去する。これはアセトンと、その超音波洗浄で簡単に除去することができる。こうして作製したフォトマスクを用いてフォトリソグラフィを行った。

Appendix B 使用プロセス装置一覧

このプロセスでは多様な装置を使用する。実際に使用した装置についてまとめる。

MOVPE crystal growth

AIXTRON AIX 200/4



Mask aligner

ZUSS Microtech



Spin coater

ミカサ株式会社 1H-D4



EB lithography (for gratings)

クレステック CABL 9000



Sputter

ULVAC 超高真空小型 3 元スパッタ装置



EB evaporator

ULVAC 電子ビーム蒸着装置



Sputter(for backside Au)

サンヨー電子 Quick Coater



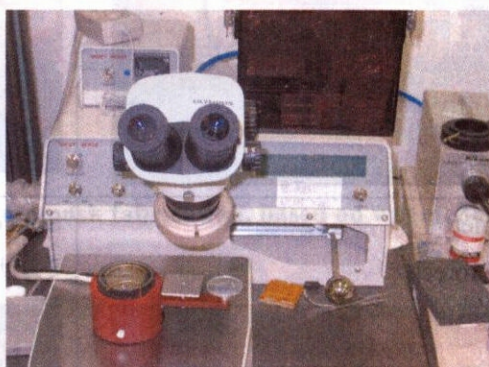
ICP dry etcher

ANELVA 小型 ICPドライエッチング装置



Die bonder

WESTBOND



SEM

日立ハイテクノロジーズ FE-SEM



EB lithography (for photomasks)

ADVANTEST F5112 + VD01



Appendix C 略語一覧

AOFF	All-Optical Flip-Flop
AR	Anti-Reflection
ASE	Amplified Spontaneous Emission
ATT	optical ATTenuator
AWG	Arrayed Waveguide Grating
BER(T)	Bit Error Rate (Tester)
BLD	Bistable Laser Diode
BPF	Band Pass Filter
CR	Clock Recovery
CW	Continuous Wave
DBR	Distributed Bragg Reflector
DEMUX	DE-MultipleX
DFT	Discrete Fourier Transform
(F)DL	(Fiber) Delay Line
DMZ	DiMethyl Zinc
DSO	Digital Sampling Oscilloscope
DUT	Device Under Test
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EB	Electron Beam
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
FBG	Fiber Bragg Grating
FD-BPM	Finite Different Beam Propagation Method
FFT	Fast Fourier Transform
FP	Fabry-Pérot
FSR	Free Spectrum Range
FWM	Four Wave Mixing
ICP	Inductive Coupled Plasma
IPA	IsoPropyl Alcohol
ISO	optical ISOlator
ITU	International Telecommunication Union
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LD	Laser Diode

LN	Lithium Niobate
MIBK	Methyl IsoButyl Ketone
MMI	MultiMode Interference
MOVPE	MetalOrganic Chemical Vapor Epitaxy
MQW	Multiple Quantum Well
MUX	MULTipleX
MZI	Mach-Zehnder Interferometer
NRZ	Non Return to Zero
OEO	Optical-Electric-Optical
OSNR	Optical Signal-Noise Ratio
OTDM	Optical Time Domain Multiplexing
PC	Polarization Controller
PD	Photo Detector (Diode)
PIC	Photonic Integrated Circuit
PPG	Pulse Pattern Generator
PRBS	Pseudo Random Bit Sequence
RZ	Return to Zero
SA	Saturable Absorber
SBW	Saturated Bromine Water
SCH	Separated Confinement Heterostructure
SEM	Scanning Electron Microscopy
SMF	Single Mode Fiber
SMSR	Side Mode Suppression Ratio
SNR	Signal-Noise Ratio
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SPC	Serial-Parallel Conversion
TBA	Tertiary-Butyl Arsine
TBP	Tertiary-Butyl Phosphine
TMG	TriMethyl Gallium
TMI	TriMethyl Indium
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser
VOA	Variable Optical Attenuator
XPM	Cross Phase Modulation

参考文献

- [1] 光産業振興協会 <http://www.oitda.or.jp>
- [2] Martin T. Hill, “All-Optical Flip-Flop Based on Coupled Laser Diodes”, *Microwave and Optical Technol. Lett.* vol.25 (2000) p.157 – 159
- [3] Martin T. Hill, H. de Waardt, G. D. Khoe, and H. J. S. Dorren, “All-Optical Flip-Flop Based on Coupled Laser Diodes”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.37 (2001) p.405 – 413
- [4] S. Zhang, D. Owens, Y. Liu, M. T. Hill, D. Lenstra, A. Tzanakaki, G. D. Khoe, and H. J. S. Dorren, “Multi-state Optical Memory Based on Serially Interconnected Lasers”, *Proc. 2005 European Conf. on Optical Communication*, Th1.3.2
- [5] Shaoxian Zhang, Dan Owens, Yong Liu, Martin Hill, Daan Lenstra, Anna Tzanakaki, Giok-Djan Khoe, H. J. S. Dorren, “Multistate Optical Memory Based on Serially Interconnected Lasers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol.17 (2005) p.1962 – 1964
- [6] Y. Liu, M. T. Hill, N. Calabretta, H. de Waardt, G. D. Khoe, and H. J. S. Dorren, “Three-State All-Optical Memory Based on Coupled Ring Lasers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol.15 (2003) p.1461 – 1463
- [7] Eduward Tangdionga, Xuelin Yang, Zhonggui Li, Yong Liu, Daan Lenstra, Giok-Djan Khoe, and Harm J. S. Dorren, “Optical Flip-Flop Based on Two-Coupled Mode-Locked Ring Lasers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol.17 (2005) p.208 – 210
- [8] Martin T. Hill, Harmen J. S. Dorren, Tjibbe de Vries, Xaveer J. M. Leijtens, Jan Hendrik den Besten, Barry Smalbrugge, Yok-Siang Oei, Hans Binsma, Giok-Djan Khoe, and Meint K. Smit, “A fast low-power optical memory based on coupled micro-ring lasers”, *Nature* vol.432 (2004) p.206 – 208
- [9] Martin T. Hill, T. de Vries, H. J. S. Dorren, X. J.M. Leijtes, J. H. C. van Zantvoort, J. H. den Besten, E. Smalbrugge, Y. S. Oei, J. J. M. Binsma, G. D. Khoe, and M. K. Smit, “Integrated Two-State AWG-Based Multiwavelength laser”, *IEEE Photon Technol. Lett.* vol.17 (2005) p.956 – 958
- [10] Y. Liu, E. Tangdionga, M. T. Hill, J. H. C. van Zantvoort, E. Smalbrugge, T. de Vries, H. Binsma, Y. S. Oei, X. J. M. Leijtens, M. K. Smit, G. D. Khoe, and H. J. S. Dorren, “All-optical Switching of 80 Gb/s Data Packets using a Wavelength Converter Controlled by a Monolithically Integrated Optical Flip-Flop”, *Proc. 2005 European Conf. on Optical Communication*, PDP4.3.2
- [11] Y. Liu, E. Tangdionga, M. T. Hill, Z. Li, S. Zhang, H. de Waardt, J. H. C. van Zantvoort, E. Smalbrugge, T. de Vries, Binsma, Y. S. Oei, X. J. M. Leijtens, M. K. Smit, A. M. K. Koonen, G. D. Khoe, and H. J. S. Dorren, “160 Gb/s SOA-based Wavelength Conversion and

- All-optical Switching of 80 Gb/s Data Packets using a Wavelength Converter and a Monolithically Integrated Optical Flip-Flop”, 2005 BroadBand Europe
- [12] Martin T. Hill, H. de Waardt, G. D. Khoe, and H. J. S. Dorren, “Fast Optical Flip-Flop by use of Mach-Zehnder Interferometers”, *Microwave and Optical Technol. Lett.* vol. 31 (2001) p.411 – 415
 - [13] Martin T. Hill, H. J. S. Dorren, X. J. M. Leijtens, J. H. den Besten, T. de Vries, J. H. C. van Zantvoort, E. Smalbrugge, Y. S. Oei, J. J. M. Binsma, G. D. Khoe, and M. K. Smit, “Coupled Mach-Zehnder interferometer memory element”, *Optics Letters* vol.30 (2005) p.1710 – 1712
 - [14] Centre for Integrated Photonics, <http://www.ciphotonics.com/>
 - [15] Y. Liu, R. McDougall, J. Seoane, E. Kehayas, M. T. Hill, G. Maxwell, S. Zhang, R. Harmon, F. M. huijskens, L. Rivers, P. V. Holm-Nielsen, J. M. Martinez, J. Herrera, F. Ramos, J. Marti, H. Avramopoulos, P. Jeppesen, A. M. J. Koonen, A. Poustie, and H. J. S. Dorren, “Characterization of Hybrid Integrated All-Optical Flip-Flop”, 2006 IEEE Laser and Electro Optics Society ThBB1 (invited)
 - [16] E. Kehayas, J. Seoane, Y. Liu, J. M. Martinez, J. Herrera, P. V. Holm-Nielsen, S. Zhang, R. McDougall, G. Maxwell, F. Ramos, J. Marti, H. J. S. Dorren, P. Jeppesen, and H. Avramopoulos, “All-Optical Network Subsystems Using Integrated SOA-Based Optical Gates and Flip-Flops for Label-Swapped Networks”, *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol.18 (2006) p.1750 – 1752
 - [17] John E. Johnson, C. L. Tang, and W. J. Grande, “Optical flip-flop based on two-mode intensity bistability in a cross-coupled bistable laser diode”, *Appl. Phys. Lett.* vol.63 (1993) p.3273 – 3275
 - [18] F. Robert, D. Fortusini, and C. L. Tang, “All-Optical Set-Reset Operation of a Bistable Semiconductor Laser Intracavity-Coupled to a Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser”, *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol.12 (2000) p.465 – 467
 - [19] Mitsuru Takenaka and Yoshiaki Nakano, “Realization of All-Optical Flip-Flop Using Directionally Coupled Bistable Laser Diode”, *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol.16 (2004) p.45 – 47
 - [20] H. Kawaguchi, I. S. Hidayat, y. Takahashi, and Y. Yamayoshi, “Pitchfork bifurcation polarization bistability in vertical-cavity surface-emitting lasers”, *Electron. Lett.* vol.31 (1995) p.109 – 111
 - [21] H. Kawaguchi, “Bistable Laser Diodes and Their Applications: State of the Art”, *IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron.* vol.3 (1997) p.1254 – 1270
 - [22] H. Kawaguchi, “All-Optical Signal Processing using Polarization Bistable VCSELs”, *Proc. 2005 International Conference on Transparent Optical Networks*, We.A2.1
 - [23] Mitsuru Takenaka and Yoshiaki Nakano, “Multimode Interference Bistable Laser Diode”,

- IEEE Photon. Technol. Lett. vol.15 (2003) p.1035 – 1037
- [24] Mitsuru Takenaka, “Study on All-Optical Flip-Flop using Bistable Laser Diodes with Nonlinear Couplers”, Doctoral Dissertation of The University of Tokyo (Dec. 2002)
- [25] Mitsuru Takenaka, Maura Raburn, and Yoshiaki Nakano, “All-Optical Flip-Flop Multimode Interference Bistable Laser Diode”, IEEE Photon. Technol. Lett. vol.17 (2005) p.968 – 970
- [26] 池上徹彦 監修、土屋治彦・三上修 編著、「半導体フォトニクス工学」、コロナ社 ISBN: 4-339-00623-8
- [27] 岡本勝就 著、「光導波路の基礎」、コロナ社 ISBN: 4-339-00602-5
- [28] 沼居貴陽 著、「半導体レーザー工学の基礎」、丸善株式会社 ISBN:4-621-04208-4
- [29] 河野健治、鬼頭勤 共著、「光導波路解析の基礎」、現代工学社 ISBN: 4-87472-186-9-C3055
- [30] Lucas B. Soldano and Erik C. M. Pennings, “Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications”, IEEE J. Lightwave Technol vol.13 (1995) p.615 – 627
- [31] B. Bachmann, P. A. Besse, and H. Melchior, “General self-imaging properties in $N \times N$ multimode interference couplers including phase relations”, Appl. Optics vol.18 (1994) p.3905 – 3911
- [32] L. H. Spiekman, Y. S. Oei, E. G. Metaal, F. H. Groen, I. Moerman, and M. K. Smit, “Extremely Small Multimode Interference Couplers and Ultrashort Bends on InP by Deep Etching”, IEEE Photon. Technol. Lett. vol.6 (1994) p.1008 – 1010
- [33] Hongzhen Wei, Jinzhong Yu, Zhongli Liu, Xiaofeng Zhang, Wei Shi, and Changshui Fang, “Fabrication of 2×2 tapered multimode interference coupler”, Electron. Lett. vol.36 (2000) p.1618 – 1619
- [34] R. Hanfoug, L. M. Augustin, Y. Barbarin, J. J. G. M. van der Tol, E. A. J. M. Bente, F. Karouta, D. Rogers, S. Cole, Y. S. Oei, X. J. M. Leijtens, and M. K. Smit, “Reduced reflections from multimode interference couplers”, Electron Lett. vol.42 (2006) p.465 – 466
- [35] Jan De Merlier, Geert Morthier, and Roel Baets, “The Influence of Lateral Carrier Diffusion and Surface Recombination on the Behavior of Semiconductor Optical Amplifier (SOA)-Based MMIs”, IEEE J. Quantum. Electron. vol.39 (2003) p.880 – 885
- [36] W. B. Joyce, “Carrier transport in double-heterostructure active layers”, J. Appl. Phys. vol.53 (1982) p.7235 - 7239
- [37] G. J. Lasher, “Analysis of a Proposed Bistable Injection Laser”, Solid-State Electron. vol.7 (1964) p.707 – 716
- [38] 黒川隆志 著、「光機能デバイス」、共立出版株式会社 ISBN: 4-320-08562-0
- [39] H. Kawaguchi, “Absorptive and dispersive bistability in semiconductor injection lasers”, Optical and Quantum Electron. vol.19 (1987) p.S1 – S36

- [40] Mitsuhiro Yano, Hiroshi Nishi, and Masahito Takusagawa, "Theoretical and Experimental Study of Threshold Characteristics in InGaAsP – InP DH Lasers", IEEE J. Quantum Electron. vol.QE-15 (1979) p.571 – 579
- [41] Hiroyuki Uenohara, "A Study of Multiple Quantum Well Bistable Lasers for Application to All-Optical Signal Processing", Doctor thesis of Tokyo Inst. Technol. (1995)
- [42] Hiroyuki Uenohara, Ryo Takahashi, Yuichi Kawamura, and Hidetoshi Iwamura, "Static and Dynamic Response of Multiple-Quantum-Well Voltage-Controlled Bistable Laser Diodes", IEEE J. Quantum Electron. vol.32 (1996) p.873 – 883
- [43] C. L. Tang, A. Schremer, and T. Fujita, "Bistability in two-mode semiconductor lasers via gain saturation", Appl. Phys. Lett. vol.51 (1987) p.1392 – 1394
- [44] Ching-Fuh Lin and Pei-Cheng Ku, "Analysis of stability in two-mode laser systems", J. Quantum Electron. vol.32 (1996) p.1377 – 1382
- [45] 草野英二 著、「はじめての薄膜作製技術」、工業調査会 ISBN: 4-7693-1252-0
- [46] 岡崎信次、鈴木章義、上野巧 著、「はじめての半導体リソグラフィ技術」、工業調査会 ISBN: 4-7693-1224-6
- [47] Takashi Matsuoka and Haruo Nagai, "InP Etchant for Submicron Patterns", J. Electrochem. Society vol.133 (1986) p.2485 – 2491
- [48] Sadao Adachi and Hitoshi Kawaguchi, "Chemical Etching Characteristics of (001) InP", J. Electrochem. Society vol.128 (1981) p.1342 – 1349
- [49] R. Y. Fang, D. Bertone, G. Morello, and M. Meliga, "Eaves Structures on (100) InP and InP/InGaAsP/InP Heterostructures", J. Electrochem. Society vol.144 (1997) p.3940 – 3945
- [50] T. Nishida and T. Tamamura, "Microloading Effect in InP Wet Etching", J. Electrochem. Society vol.140 (1993) p.2414 – 2421
- [51] D. T. C. Huo, M. F. Yan, J. D. Wynn, and D. P. Wilt, "Effects of Mask Imperfections on InP Etching", J. Electrochem. Society vol.137 (1990) p.239 – 242
- [52] 今井聖 著、「信号処理工学」、コロナ社 ISBN: 4-339-01058-8
- [53] E. Garmire, J. H. Marburger, S. D. Allen, and H. G. Winful, "Transient response of hybrid bistable optical devices", Appl. Physics Lett. vol.34 (1979) p.374 – 376
- [54] Juerg Leuthold, Pierre A. Besse, Juerg Eckner, Emil Gamper, Marcus D'ulck, and Hans Melchior, "All-Optical Space Switches with Gain and Principally Ideal Extinction Ratios", IEEE J. Quantum Electron. vol.34 (1998) p.622 – 633
- [55] Jürg Leuthold, "Advanced Indium-Phosphide Waveguide Mach-Zehnder Interferometer All-Optical Switches and Wavelength Converters", Hartung-Gorre Verlag, ISBN: 3-89649-427-9

関連する発表

学術雑誌等に発表した論文

- [1] Koji Takeda, Mitsuru Takenaka, Maura Raburn, Yasuki Kanema, Jonathon S. Barton, Xueliang Song, and Yoshiaki Nakano, “Dynamic Operation of All-Optical Flip-Flops with Distributed Bragg Reflectors for Self-routing of 10-Gb/s Optical Packets”, Japan Journal of Applied Physics, vol.46 (2007) (採録決定済)
- [2] Maura Raburn, Mitsuru Takenaka, Koji Takeda, Xueliang Song, Jonathon S. Barton, and Yoshiaki Nakano, “Integrable Multi-Mode Interference Laser All-Optical Flip-Flops”, IEEE Photonics Technology Letters, pp.1421-1423, vol.18 (2006)
- [3] Mitsuru Takenaka, Koji Takeda, and Yoshiaki Nakano, “All-optical packet switching and label buffering by MMI-BLD optical flip-flop”, IEICE Electronics Express, Vol.3, No.15, pp.368-372 (2006)
- [4] M. Takenaka, K. Takeda, Y. Kanema, Y. Nakano, M. Raburn, and T. Miyahara, “All-optical switching of 40 Gb/s packets by MMI-BLD optical label memory”, Optics Express, Vol. 14, Issue 22, pp. 10785-10789 (2006)

学会発表論文（海外）

- [5] Koji Takeda, Mitsuru Takenaka, Maura Raburn, Xueliang Song, Jonathon S. Barton, and Yoshiaki Nakano, “All-Optical 10-Gbps Packet Switching by DBR-MMI-BLD All-Optical Flip-Flop”, 2006 International Semiconductor Laser Conference, TuA2, Hawaii (USA), Sep.2006
- [6] Koji Takeda, Mitsuru Takenaka, Maura Raburn, Xueliang Song, Jonathon S. Barton, and Yoshiaki Nakano, “Single Mode and Dynamic All-Optical Flip-Flop Operation of Multimode Interference Bistable Laser Diodes with Distributed Bragg Reflectors”, 2006 European Conference on Optical Communication, Th1.1.4, Cannes (France), Sep.2006
- [7] M. Takenaka, K. Takeda, Y. Kanema, M. Raburn, T. Miyahara, H. Uetsuka, Y. Nakano, “320 Gb/s Optical Packet Switching using All-Optical Signal Processing by and MMI-BLD Optical Flip-Flop”, 2006 European Conference on Optical Communication, Th4.5.2, Cannes (France), Sep.2006
- [8] M. Takenaka, M. Raburn, K. Takeda, Y. Nakano, “All-Optical Packet Switching by MMI-BLD Optical Flip-Flop”, 2006 Optical Fiber Communication Conference, OThS3, Anaheim (California, USA), Mar.2006

- [9] M. Raburn, M. Takenaka, T. Koji, X. Song, J. S. Barton, and Y. Nakano, “Full C-Band Operation of Multi-Mode Interference Distributed Bragg Reflector Laser All-Optical Flip-Flops”, 2006 Conference on Lasers & Electro-Optics / Quantum Electronics and Laser Science Conference, CMD3, Long Beach (California, USA), May 2006
- [10] M. Raburn, M. Takenaka, T. Koji, X. Song, J. S. Barton, and Y. Nakano, “FABRICATION OF InP/InGaAsP MULTI-MODE INTERFERENCE DISTRIBUTED BRAGG REFLECTOR LASER ALL-OPTICAL FLIP-FLOPS”, 2006 Indium Phosphide and Related Material, TuA3.2, Princeton University (New Jersey, USA), May 2006

学会発表論文（国内）・シンポジウム等

- [11] 武田 浩司、竹中 充、レイバン モーラ、金間 泰樹、宋 学良、バルトン ジョナサン、中野 義昭、「DBR 型 MMI-BLD の動的全光フリップ・フロップ動作」、第 67 回応用物理学会学術講演会、1a-ZX-1、立命館大学(滋賀)、2006 年 9 月
- [12] 武田 浩司、レイバン モーラ、竹中 充、バルトン ジョナサン、宋 学良、中野 義昭、「DBR を用いた MMI 全光フリップ・フロップの単一モード発振及び C バンド全域動作」、第 53 回応用物理学関係連合講演会、22p-Y-11、武蔵工業大学(東京)、2006 年 3 月
- [13] 竹中 充、モーラ レイバン、武田 浩司、イト フーチョン、宋 学良、中野 義昭、「能動 MMI 型全光フリップ・フロップおよびマッハ・ツェンダー型 SOA を用いた信号再生型波長変換動作」、電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-3-35、北海道大学(北海道)、2005 年 9 月
- [14] 竹中 充、武田 浩司、イト フーチョン、中野 義昭、「MMI 光フリップ・フロップを用いた全光パケット・スイッチング」、電子情報通信学会総合大会、C-3-23、国士舘大学(東京)、2006 年 3 月
- [15] Maura Raburn, Mitsuru Takenaka, Jonathon Barton, Song Xueliang, Koji Takeda, Yoshiaki Nakano, 「Design and Preliminary Fabrication of Integrable All-Optical Flip-Flops Based on DBR Multimode Interference Bistable Laser Diode Structure」、電子情報通信学会ソサイエティ大会、CS-8-7、北海道大学(北海道)、2005 年 9 月
- [16] 竹中充、武田浩司、モーラ レイバン、宮原利治、上塚尚登、中野義昭、「MMI 型光ラベル・メモリによる 320Gb/s 光パケット・スイッチング」、電子情報通信学会 OPE・EMT・LQE・PN 合同研究会、大阪、2007 年 1 月(招待講演)
- [17] 竹中充、武田浩司、モーラ レイバン、宮原利治、上塚尚登、中野義昭、「MMI 型双安定レーザーの研究開発および全光パケットスイッチングへの応用」、レーザー学会、2007 年 1 月(招待講演)

謝辞

本研究を進めるにあたり、本当にたくさんの方々に協力いただきました。この場をお借りして深く感謝致します。

指導教員である中野教授には熱心に指導いただき、また暖かく見守っていただき快適な研究室生活を送ることができ、数多くの発表の機会を与えていただきました。

同じ研究チームで全光フリップ・フロップを研究してきた竹中博士、Dr. Raburn には、全光フリップ・フロップの理論に始まり、その作製手法、また極めて複雑なデバイス測定系など全てを教えていただき、最初から最後までスムーズに研究を進めていくことができました。

清水助手には、各種半導体プロセス装置の使い方や管理方法を教えていただきました。また、薬品の廃液処理を全てやっていただきました。

宋博士には、このような高機能デバイスで数多く必要となるフォトマスクの作製方法を教えていただきました。フォトマスクはデザインを変更するたびに最低 4 枚必要になるため、自分で作製できることは大変ためになりました。フォトマスク作製に関しては他にも特に久保田助手、田中研究室杉浦氏、同研究室原田氏によくお世話になりました。特に杉浦氏には描画データの変換ソフトウェアまで開発していただき、大変使い勝手の良いソフトウェアで現在でもこれを使ってデータの変換を行っています。

中野・杉山研究室で主に結晶成長の研究を行っており、かつ MOVPE の管理者でもある塩田氏には、装置の使用法を丁寧に教えていただき、また MOVPE の保守の点でも大変お世話になりました。他にも結晶成長を研究としている鬼塚氏、出浦氏には特に MOVPE の保守でお世話になりました。

中野・杉山研究室の全メンバーとは特に研究室打ち合わせを通じて活発な議論をさせていただき、スムーズに研究を進めていくことができ、また様々なアイデアや知恵、技術を教えていただきました。

本研究は、これら数多くの人の協力なくしては成立しなかったものです。ここに改めて深く感謝致します。

2007 年 2 月 2 日

武田浩司