

半導体集積光デバイス・モノリシック光集積回路の現状と展望

種村 拓夫^{†a)} 中野 義昭[†]

Latest Technologies and Challenges of Monolithically Integrated Semiconductor Photonic Circuits

Takuo TANEMURA^{†a)} and Yoshiaki NAKANO[†]

あらまし 光集積回路 (PIC: photonic integrated circuit) の概念が S.E. Miller によって初めて提唱されてから実に 40 年の月日が経つ。以来, 変調器一体集積レーザに始まり, 多波長送受信器, 波長変換素子に至るまで, 種々の高機能光集積素子が実現してきた。最近では, 米インフィネラ社による 1.6 Tbit/s (40 チャネル × 40 Gbit/s) 送信器をはじめとし, 大規模 PIC の発展が著しい。本論文では, InP 系化合物半導体光集積回路の発展の歴史を振り返り, 最近の主要技術を紹介するとともに, 今後の展望について概説する。

キーワード 光集積回路, InP 半導体デバイス, WDM ネットワーク, 光信号処理

1. ま え が き

昨今のインターネットトラフィックの急激な増加に伴い, 基幹光伝送網を流れる情報量が上昇の一途をたどっている。光伝送技術は, 1990 年代から急速に発展した波長分割多重 (WDM: wavelength-division multiplexing) 技術の活用によって目覚ましい大容量化を遂げてきた。このような WDM 光ネットワークでは, 波長数の拡大に比例して送受信機における部品数が増加するため, 実装コスト, 消費電力, 装置サイズの面で, 光素子の簡素化が重要な課題になっている。電子デバイスにおける“ムーアの法則”と同等のスケラビリティを光デバイスにも要求する上で, 光素子の集積化は必須であり, 多様な素子をモノリシックに集積した光集積回路 (PIC: photonic integrated circuit) は, 将来の超大容量 WDM 光ネットワークを担うキーテクノロジーと期待されている。

半導体基板上に微細屈折率構造を作り込むことで, フォトンに局所的に閉じ込め, その流れを自在に制御できる, という PIC の基本概念は, 40 年近く前に S.E. Miller によって初めて提唱された [1], [2]。以来,

特に 1.55 μm 通信波長帯における各種アクティブ素子が集積可能な InP 系化合物半導体を中心として, 様々な高機能 PIC が研究されてきた。

1980 年代に本格化した PIC の初期研究は, 主に光電子集積回路 (OEIC: opto-electronic integrated circuit) [3] や変調器集積レーザ (EML: electro-absorption modulated laser) [4] ~ [6] にあてられた。有機金属気相エピタキシー (MOVPE: metal-organic vapor phase epitaxy) 結晶成長法が成熟し, バットジョイント法, オフセット量子井戸法 [7], 選択成長法 [8], 量子井戸無秩序化法 [9] など, アクティブ・パッシブ素子のモノリシック集積技術が開拓されるのに伴い, コヒーレントレーザー [7] や広範囲波長可変レーザ [10] ~ [15] など, より複雑な PIC の研究開発が活発化した。1990 年代後半に入ると, ドライエッチングによる InP の微細加工技術が成熟し, アレー導波路回折格子 (AWG: arrayed waveguide grating) を集積した光アドドロップ多重器 (OADM: optical add-drop multiplexer) [16] や WDM チャネルセレクタ [17] が実現した。2000 年以降は, 米インフィネラ社の 1.6 Tbit/s (40 チャネル × 40 Gbit/s) トランスミッタに代表される大規模 PIC が相次いで報告されており [18] ~ [22], 半導体 PIC 技術は一定の成熟期を迎えたといえる。

本論文では, InP 系化合物半導体 PIC の発展の歴史を振り返り, 最近の主要な成果を紹介するとともに,

[†] 東京大学先端科学技術研究センター, 東京都

Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8904 Japan

a) E-mail: tanemura@ee.t.u-tokyo.ac.jp

今後の展望を述べたい．2. では，InP 系半導体 PIC の研究開発を牽引してきた各種 WDM ネットワーク用 PIC 技術を概説する．3. では，将来の大規模 PIC (光 LSI) の実現に向けて不可欠となる新規光集積素子の研究動向を紹介し，4. で本論文をまとめる．

2. WDM ネットワーク用 PIC 技術

2.1 WDM 光送受信器

大容量 WDM ネットワークにおいて，全波長チャネルの送受信を一つの素子で一括して行う PIC は大変魅力的である．図 1 に，米インフィネラ社が発表した 40 チャネル × 40 Gbit/s (1.6 Tbit/s) トランスミッタを示す [19], [20]．この PIC では，分布帰還型 (DFB: distributed feedback) レーザ，電界吸収型 (EA: electro-absorption) 変調器，可変光減衰器を各 40 個，光パワーモニタ 80 個，AWG1 個を含む，計 200 個以上の光素子を 1 枚の InP チップ上にモノリシック集積することに成功している．出力光は 50 GHz 間隔の ITU 波長グリッドにロックされ，多チャネル間の光学的及び電気的なクロストークは 20 dB 以下に抑えられている．更に同社は，半導体光増幅器 (SOA: semiconductor optical amplifier) を集積した 10 チャネル × 40 Gbit/s 高出力トランスミッタ [21] や 40 チャネル偏波無依存レシーバ [22] など，大規模 PIC を相次いで報告しており，注目を集めている．

上記以外にも，アクセス系におけるブロードバンド化を背景に，100 Gb イーサネット (100 GbE) をターゲットとした安価な送受信 PIC の研究開発が，国内外で活発化している [23], [24]．図 2 には，NTT が発表した 4 チャネル × 25 Gbit/s による 100 GbE トランスミッタを示す [23]．特徴的なのは，分布ブラッグ反射型 (DBR: distributed Bragg reflector) レーザに周波数直接変調を施し，出力光を光バンドパスフィルタに通すことで強度変調に変換する，という独自の調手法を用いる点である．周波数変調であるため，直接変調にもかかわらずレーザの緩和振動周波数に律速されず，簡易な構成で高速信号が作成できるという利点がある．外付けのマツハツエング干渉計型光フィルタを用いることで，4 チャネル WDM 信号を一括して強度変調信号に変換し，分散補償を行うことなく，40 km の SMF (single-mode fiber) 伝送実験に成功している．

一方，WDM ネットワークの受信側では，所望のチャネルを選択するチャネルセクタが重要となる．

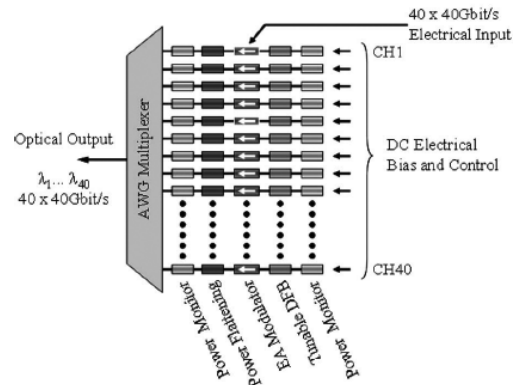
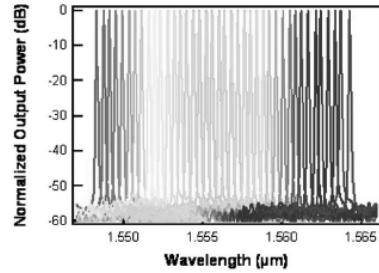


図 1 40 チャネル × 40 Gbit/s 光トランスミッタ PIC の構成と出力光スペクトル [20]

Fig. 1 Architecture and output spectrum of 40 channel × 40 Gbit/s PIC transmitter chip [20]. Reprinted by permission from IEEE©2006.

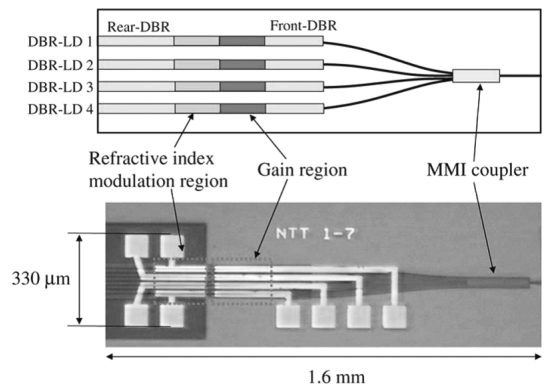


図 2 周波数直接変調型 4 チャネル × 25 Gbit/s 光トランスミッタ PIC [23]

Fig. 2 4 channel × 25 Gbit/s PIC transmitter based on frequency-modulated lasers [23]. Reprinted by permission from IEEE©2008.

図 3 に，NTT が発表した 64 チャネル WDM チャネルセクタを示す [17]．1 × 8 AWG，SOA ゲートスイッチ (1 段目)，8 × 8 AWG，SOA ゲートスイッチ (2 段目)，8 × 1 MMI (multi-mode interfer-

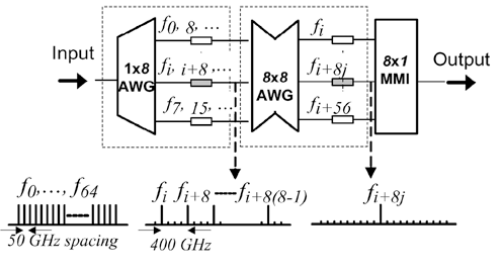
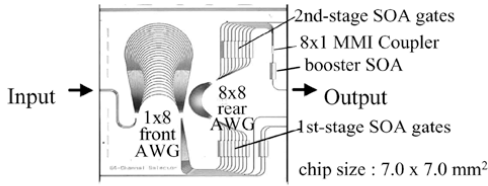


図3 多段 AWG と SOA を集積した 64 チャンネル WDM チャンネルセクタ [17]

Fig. 3 64-channel WDM channel selector with cascaded AWGs and SOAs [17]. Reprinted by permission from IEEE©2002.

ence) カプラ, ブースター SOA を縦続接続した構成になっている. 二つの AWG の波長間隔をそれぞれ 400 GHz と 50 GHz (FSR: free spectral range はそれぞれ 3.2 THz と 400 GHz) に設計することにより, 50 GHz 間隔の 64 チャンネルセクタを実現している. 1 × 64 AWG を 1 段用いる手法に比べて, SOA の数が 16 個と少なく済むという利点がある.

2.2 コヒーレント送受信器

周波数利用効率や群速度分散耐性の観点から, 大容量 WDM ネットワークにおいて多値コヒーレント変復調方式の導入が検討されている. それに呼応して, 各種コヒーレント変復調方式に対応した送受信 PIC が, 近年, 数多く報告されている [25] ~ [29].

前述したインフィネラ社では, 図 1 と同様の PIC で, EA 変調器をマツツェンダ型 IQ 変調器に置き換えた, 10 チャンネル × 40 Gbit/s DQPSK (differential quadrature phase-shift keying) トランスミッタを最近発表した [26].

一方, 図 4 には, アルカテル・ルーセント社が開発した 43 Gbit/s 16QAM (quadrature-amplitude-modulation) 変調器を示す [27]. 二つの 1 × 4 不均一スターカプラと四つの EA 型強度変調器をモノリシック集積することで, 従来の LiNbO₃ 変調器に比べて格段に小型な (3.1 mm × 345 μm) 変調器を実現している. 同グループでは, 更に, 上記と同様の手法を用

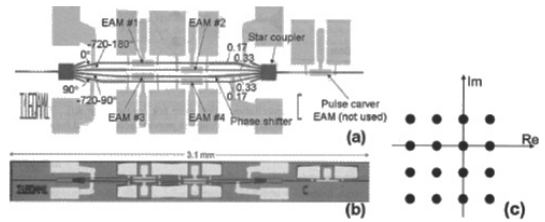


図 4 スターカプラと EA 変調器を用いた 43 Gbit/s 16QAM 変調器 [27]

Fig. 4 43-Gbit/s 16-QAM InP modulator with star couplers and EA modulators [27].

いた DQPSK 変調器 [28] や, 2 × 4 スターカプラを用いた 43 Gbit/s DQPSK レシーバ [29] など, コンパクトな InP コヒーレント送受信 PIC を多数報告している.

2.3 波長可変光源

1.55 μm の通信波長帯を広くカバーする安価かつコンパクトな波長可変レーザは, リンコンフィギュラブル WDM システムや, 波長パルスルーチングを用いた次世代フォトニックネットワークにおいて大変重要である. また, 後述する可変波長変換器や, AWG と組み合わせた光パケットスイッチを構成する上でも必要であり, 古くから活発な研究開発が進められている.

広帯域波長可変レーザは, 大別すると, パーニア効果を用いて波長可変範囲を拡大する手法 [10] ~ [12] と, 比較的狭い可変波長範囲をもつ DFB/DBR レーザをアレー状に複数個集積する手法 [13] ~ [15] に分類される.

前者は, レーザキャビティ中に FSR の異なる共振器を複数もち, 各々の共振波長ピークを独立に制御することにより, 発振波長を幅広く可変にする手法である. 共振器としては, サンプルドグレーティング DBR やリング共振器が用いられ, 主に, 米 UCSB [10], NTT [11], 米ブックハム社 [12] などを中心に, 古くから研究が行われている.

一方, 後者の一例として, TDA (tunable distributed amplification)-DFB レーザをアレー状に集積した NTT の最近の成果を図 5 に示す [15]. TDA-DFB レーザとは, 利得領域と位相調整領域が交互に繰り返す構造をした DFB レーザであり, 一本の制御電流を調整することで, キャビティの縦モードと DFB のブラッグ波長を同期して変えることが可能である. そのため, モードホップを引き起こすことなく, 簡易な制御回路で広い可変波長範囲が得られる. 図 5 では,

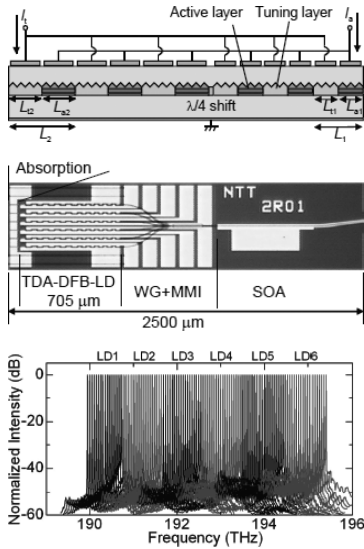


図 5 TDA-DFB レーザをアレー状に集積した広帯域波長可変光源 [15]
 Fig. 5 Widely tunable light source based on TDA-DFB laser array [15]. Reprinted by permission from IEEE©2008.

周期構造を非対称にすることで、TDA-DFB レーザ一つ当りの波長範囲を 8.0 nm まで拡大し、これを六つ集積することで、44 nm (50 GHz 間隔で 110 波長) もの連続波長可変特性を実現している。なお、利得領域と位相調整領域の周期は 60 ~ 81 μm であり、パットジョイント手法を用いることで、光結合効率の高いアクティブ・パッシブ集積に成功している。

2.4 可変波長変換器

光-電気-光 (OEO) の変換を介さずに光の波長を変換する波長変換器は、WDM ネットワークの光中継器や、将来の光パケットスイッチネットワークにおいて、重要な役割を果たす。特に、波長可変レーザをモノリシックに内蔵した可変波長変換器は大変魅力的であり、米 UCSB を中心に精力的な研究が行われてきた [30] ~ [33]。

図 6 に、UCSB から最近発表された光電流型 40 Gbit/s 可変波長変換デバイスを示す [32]。従来、波長変換器としては、SOA 中の光非線形効果を利用した全光学的なものが多く報告されているが、本素子は、広帯域受光器と進行波型マッハツェンダ (MZ: Mach-Zehnder) 変調器をモノリシック集積することにより、光電流を介した波長変換を行っている。そのため、入力光の波長無依存性、ビットレート無依存性、入力光と出力光の分離など、波長変換器において重要

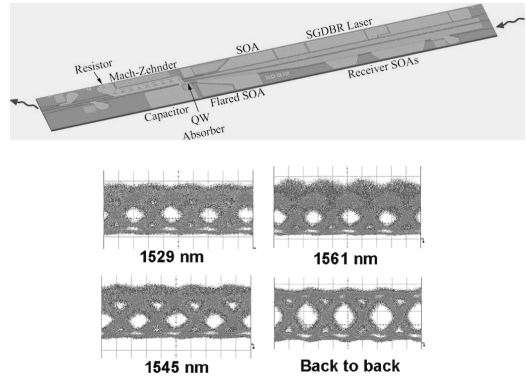


図 6 可変波長レーザ、受光器、MZI 変調器を集積した光電流型可変波長変換器。下図は、40 Gbit/s 可変波長変換結果 [32]

Fig. 6 Tunable wavelength converter based on separate absorption and modulation, comprising tunable-wavelength laser, photodetector, and MZ modulator. The lower figure shows the results of 40-Gbit/s tunable wavelength conversion [32]. Reprinted by permission from IEEE©2008.

な諸性能を満たしている。サンプルドグレーティング DBR (SG-DBR) を用いた波長可変レーザと三つの SOA も集積することで、1530 ~ 1560 nm の任意の波長間について、40 Gbit/s NRZ 信号のエラーフリー変換に成功している。同グループでは、同様の素子の 10 Gbit/s での 2R 再生機能も実証しており [33]、光 2R/3R 中継素子の実現が期待される。

3. 大規模 PIC に向けた光集積素子

前章で紹介したように、これまでの PIC は、主に大容量 WDM ネットワークをターゲットとし、低コストな光送受信コンポーネントとして研究開発が推し進められてきた。その結果、200 以上もの光素子を集積した大規模 PIC の作製技術が確立し、今後は、本格的な光 LSI (PLSI: photonic LSI) の時代が到来すると予想される。PLSI を実現する上では、光フリップフロップや非相反素子など、これまでにない機能をもつ光集積素子が必要になる。本章では、これらデジタルフォトニクスデバイスの基礎研究について最近の動向を紹介する。

3.1 光フリップフロップ

1 チップ上に集積する素子数が増加するにつれて、光信号の波形再生やクロック同期をチップ内で行う必要が生じる。このようなデジタル光信号処理を行う上で基本となる素子が光フリップフロップであり、近年、

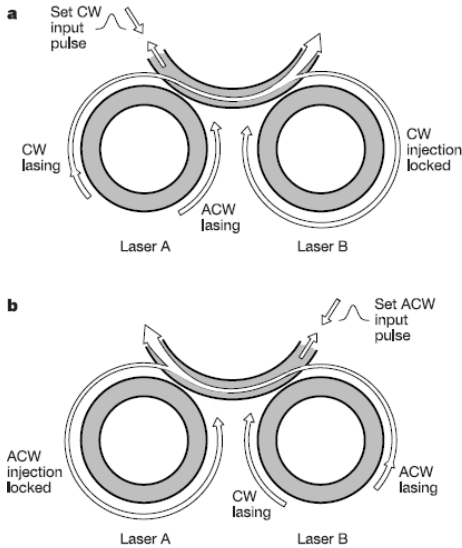
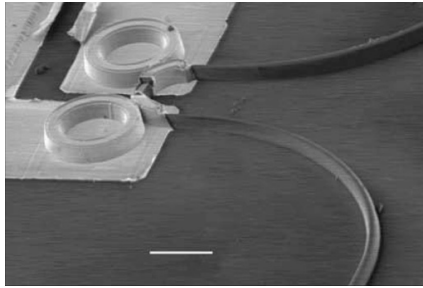


図 7 マイクロリングレーザ型光フリップフロップ [34]
 Fig. 7 Photonic flip-flop based on microring lasers [34]. Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Nature©2004.

国内外の大学や研究機関を中心に活発に研究が進められている。

図 7 に、アイントホーフエン工科大学から発表されたマイクロリングレーザ型光フリップフロップを示す [34]。二つのマイクロリングレーザが光導波路を介して結合した構造をもつが、片方のリングレーザからの出力光が他方のレーザに結合することで、注入同期を介して、二つ目のレーザの発振モード（時計回りか反時計回りか）が定まる。どちらのレーザに注入同期がかかっているかによって、左右のポートからの出力光パワーに差が生じる。この状態は、外部からセット光を入力しない限り維持されるため、1 ビットの光フリップフロップ（光メモリ）として動作する。図 7 では、リングレーザの直径を 16 μm まで小さくすることで、20 ps 以下の高速スイッチ応答と 5.5 fJ の低光パ

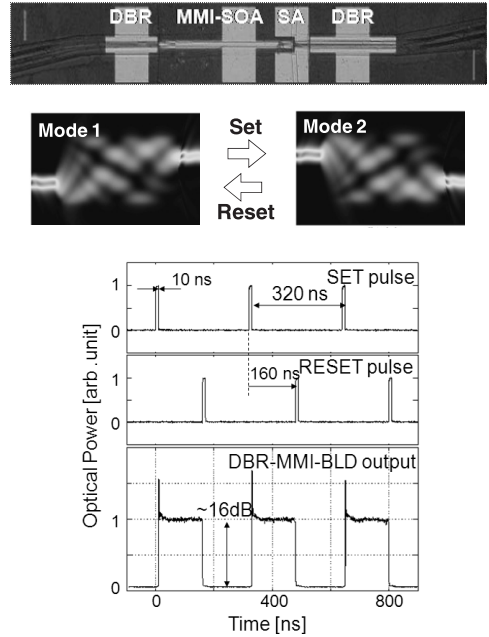


図 8 MMI 双安定レーザ型光フリップフロップ [35] ~ [38]
 Fig. 8 Photonic flip-flop based on MMI bistable laser diode [35] ~ [38].

ワーでの動作を実証している。

一方、図 8 には、筆者らが開発した MMI 双安定レーザ型光フリップフロップを示す [35] ~ [38]。2 × 2 MMI コブラ型 SOA の両ポートに DBR と過飽和吸収体 (SA: saturable absorber) を集積した構造をもつ。MMI がクロスコブラとして働くため、二つのレーザ発振モードが縮退して存在する。外部からセット/リセット光を注入することにより、発振モードを切り換えることができ、光フリップフロップとして動作する。前述したマイクロリングレーザ型とは異なり、注入同期現象を用いないため、セット/リセット光の波長や偏光状態に依存しない動作が可能である [38]。一方、キャリア緩和振動とフォトン寿命で決まるフリップフロップの応答速度は、現在 300 ps 程度であり、キャビティを小型化することで、更なる高速化が望める。

3.2 非相反光素子

多数の光素子を縦続集積する PLSI では、後段の素子からの戻り光の影響を除去するために、PIC 内に集積可能な非相反光素子 (アイソレータ) が必要となる。

図 9 に、筆者らが開発した TE モード導波路型アイソレータと、それを DFB レーザにモノリシック集積した結果を示す [39]。アイソレータ部では、ハイメサ

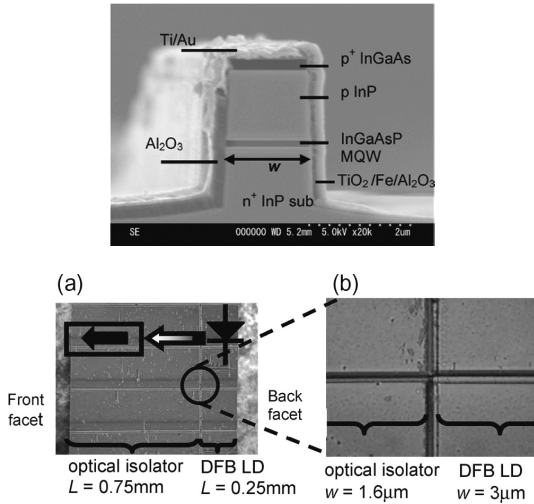


図9 導波路型光アイソレータをモノリシック集積したDFBレーザ [39]

Fig.9 DFB laser monolithically integrated with waveguide optical isolator [39].

導波路の側面に強磁性体(鉄)を蒸着しており、側面に平行な磁界をかけることで伝搬方向に依存して導波モードが変化し、非相反な光損失が生じる [40]。レーザは単一モードで発振し、外部から磁界をかけることで4 dBのアイソレーション比が確認された。最近では、強磁性 MnAs 薄膜をエピタキシャル成長させることにより、TMモード導波路型アイソレータの作製にも成功している [41]。今後、PLSI内に集積する上で、アイソレータの損失低減と低消費電力化が課題となる。

4. む す び

本論文では、InP系化合物半導体PICについて、研究開発動向を概説した。まず、大容量WDMネットワークにおいて重要となる各種PIC技術について、最近の動向を紹介した。中でも、インフィネラ社の1.6 Tbit/s (40チャンネル×40 Gbit/s) トランスミッタは、InP系PICの能力を遺憾なく発揮するものであり、本格的なPLSI時代の到来を予感させる。また、UCSBの変波長変換器は、高機能素子をいくつも集積した完成度の高いPICであり、コンパクトな光2R/3R中継素子の実現が期待される。一方、将来のPLSIの実現を見据えて、光フリップフロップや導波路型光アイソレータなどの新規光集積素子の基礎研究も、ここ数年で活発化している。アイントホーフエン工科大学のマイクロリングレーザ型光フリップフロ

ップと筆者らが開発したMMI双安定レーザ型光フリップフロップ及び導波路型アイソレータについて、最近の成果を紹介した。

以上のように、PIC技術の発展は顕著であり、現在、一定の成熟期を迎えている。一方で、更なる大規模化を実現するには、光学的・電氣的・熱的クロストークの削減、消費電力の低減、マルチ光入出力ポートへの高効率ファイバ結合技術など、解決すべき課題も多い。また、CMOSフォトニクス [42] やプラズモニックPIC [43] など、新しい可能性も見え始めており、今後ますます興味深い分野であり続けよう。

文 献

- [1] S.E. Miller, "Integrated optics: An introduction," Bell Syst. Tech. J., vol.48, pp.2059–2069, Sept. 1969.
- [2] S.E. Miller, "A survey of integrated optics," IEEE J. Quantum Electron., vol.8, no.2, pp.199–205, Feb. 1972.
- [3] O. Wada, T. Sakurai, and T. Nagakami, "Recent progress in optoelectronic integrated circuits (OEIC's)," IEEE J. Quantum Electron., vol.22, no.6, pp.805–821, June 1986.
- [4] M. Suzuki, Y. Noda, H. Tanaka, S. Akiba, Y. Kushiro, and H. Isshiki, "Monolithic integration of InGaAsP/InP distributed feedback laser and electroabsorption modulator by vapor phase epitaxy," J. Lightwave Technol., vol.5, no.9, pp.1277–1285, Sept. 1987.
- [5] Y. Kawamura, K. Wakita, Y. Yoshikuni, Y. Itaya, and H. Asahi, "Monolithic integration of a DFB laser and an MQW optical modulator in the 1.5 μm wavelength range," IEEE J. Quantum Electron., vol.23, no.6, pp.915–918, June 1987.
- [6] H. Soda, M. Furutsu, K. Sato, N. Okazaki, Y. Yamazaki, H. Nishimoto, and H. Ishikawa, "High-power and high-speed semi-insulating BH structure monolithic electroabsorption modulator/DFB laser light source," Electron. Lett., vol.26, no.1, pp.9–10, Jan. 1990.
- [7] T.L. Koch and U. Koren, "Semiconductor photonic integrated circuits," IEEE J. Quantum Electron., vol.27, no.3, pp.641–653, March 1991.
- [8] M. Aoki, M. Suzuki, H. Sano, T. Kawano, T. Ido, T. Taniwatari, K. Uomi, and A. Takai, "InGaAs/InGaAsP MQW electroabsorption modulator integrated with a DFB laser fabricated by band-gap energy control selective area MOCVD," IEEE J. Quantum Electron., vol.29, no.6, pp.2088–2096, June 1993.
- [9] S. Charbonneau, P.J. Poole, Y. Feng, G.C. Aers, M. Dion, M. Davies, R.D. Goldberg, and I.V. Mitchell, "Band-gap tuning of InGaAs/InGaAsP/InP laser using high energy ion implantation," Appl. Phys. Lett.,

- vol.67, no.20, pp.2954–2956, Nov. 1995.
- [10] L.A. Coldren, “Monolithic tunable diode lasers,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol.6, no.6, pp.988–999, Nov./Dec. 2000.
- [11] Y. Tohmori, Y. Yoshikuni, H. Ishii, F. Kano, T. Tamamura, Y. Kondo, and M. Yamamoto, “Broad-range wavelength-tunable superstructure grating (SSG) DBR lasers,” *IEEE J. Quantum. Electron.*, vol.29, no.6, pp.1817–1823, June 1993.
- [12] A.J. Ward, D.J. Robbins, G. Busico, E. Barton, L. Ponnampalam, J.P. Duck, N.D. Whitbread, P.J. Williams, D.C.J. Reid, A.C. Carter, and M.J. Wale, “Widely tunable DS-DBR laser with monolithically integrated SOA: Design and performance,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol.11, no.1, pp.149–156, Jan./Feb. 2005.
- [13] K. Kudo, K. Yashiki, T. Sasaki, Y. Yokoyama, K. Hamamoto, T. Morimoto, and M. Yamaguchi, “1.55- μm wavelength-selectable microarray DFB-LD’s with monolithically integrated MMI combiner, SOA, and EA-modulator,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.12, no.3, pp.242–244, March 2000.
- [14] T. Kurobe, T. Kimoto, K. Muranushi, Y. Nakagawa, H. Nasu, S. Yoshimi, M. Oike, H. Kambayashi, T. Mukaihara, T. Nomura, and A. Kasukawa, “High fibre coupled output power 37 nm tunable laser module using matrix DFB laser,” *Electron. Lett.*, vol.39, no.15, pp.1125–1126, July 2003.
- [15] N. Nunoya, H. Ishii, Y. Kawaguchi, R. Iga, T. Sato, Y. Kondo, and H. Oohashi, “110-channel operation with a 50-GHz grid in mode-hop-free tunable distributed amplification (TDA-) DFB laser array,” *Semiconductor Laser Conference, WB1, Sorrento*, Sept. 2008.
- [16] C.G.M. Vreeburg, T. Uitterdijk, Y.S. Oei, M.K. Smit, F.H. Groen, E.G. Metaal, P. Demeester, and H.J. Frankena, “First InP-based reconfigurable integrated add-drop multiplexer,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.9, no.2, pp.188–190, Feb. 1997.
- [17] Y. Yoshikuni, “Semiconductor arrayed waveguide gratings for photonic integrated devices,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol.8, no.6, pp.1102–1114, Nov./Dec. 2002.
- [18] R. Nagarajan, et al., “Large-scale photonic integrated circuits,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol.11, no.1, pp.50–65, Jan./Feb. 2005.
- [19] R. Nagarajan, et al., “Single-chip 40-channel InP transmitter photonic integrated circuit capable of aggregate data rate of 1.6 Tbit/s,” *Electron. Lett.*, vol.42, no.13, pp.771–773, June 2006.
- [20] D.H. Welch, et al., “The realization of largescale photonic integrated circuits and the associated impact on fiber-optic communication systems,” *J. Lightwave Technol.*, vol.24, no.12, pp.4674–4683, Dec. 2006.
- [21] S. Murthy et al., “Large-scale photonic integrated circuit transmitters with monolithically integrated semiconductor optical amplifiers,” *Optical Fiber Communication Conference, OWE1, San Diego*, March 2008.
- [22] R. Nagarajan et al., “Monolithic, 10 and 40 channel InP receiver photonic integrated circuits with on-chip amplification,” *Optical Fiber Communication Conference, PD32, Anaheim*, March 2007.
- [23] S. Matsuo, T. Kakitsuka, T. Segawa, R. Sato, Y. Shibata, R. Takahashi, H. Oohashi, and H. Yasaka, “4 \times 25 Gb/s frequency-modulated DBR laser array for 100-GbE 40-km reach application,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.20, no.17, pp.1494–1496, Sept. 2008.
- [24] S. Makino, H. Hayashi, K. Shinoda, T. Kitatani, T. Shiota, S. Tanaka, and M. Aoki, “Uncooled CWDM 25-Gbps EA/DFB lasers for cost-effective 100-Gbps Ethernet transceiver over 10-km SMF transmission,” *Proc. Optical Fiber Communication Conference, Paper PDP21, San Diego*, March 2008.
- [25] N. Kikuchi, H. Sanjo, Y. Shibata, K. Tsuzuki, T. Sato, E. Yamada, T. Ishibashi, and H. Yasaka, “80-Gb/s InP DQPSK modulator with an n-p-i-n structure,” *Proc. 32nd Eur. Conf. Optical Communication, Paper Th10.3.1., Dresden, Germany*, Sept. 2007.
- [26] S. Corzine et al., “10-channel \times 40 Gb/s per channel DQPSK monolithic integrated InP-based transmitter PIC,” *Proc. Optical Fiber Communication Conference, Paper PDP18, San Diego*, March 2008.
- [27] C.R. Doerr, P.J. Winzer, L. Zhang, L.L. Buhl, and N.J. Sauer, “Monolithic InP 16-QAM modulator,” *Proc. Optical Fiber Communication Conference, Paper PDP20, San Diego*, March 2008.
- [28] C.R. Doerr, L. Zhang, P.J. Winzer, J.H. Sinsky, A.L. Adamiecki, N.J. Sauer, and G. Raybon, “Compact high-speed InP DQPSK modulator,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.19, no.15, pp.1184–1186, Aug. 2007.
- [29] C.R. Doerr, L. Zhang, S. Chandrasekhar, and L.L. Buhl, “Monolithic DQPSK receiver in InP with low polarization sensitivity,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.19, no.21, pp.1765–1767, Nov. 2007.
- [30] V. Lal, M.L. Masanovic, J.A. Summers, G. Fish, and D.J. Blumenthal, “Monolithic wavelength converters for high-speed packet-switched optical networks,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol.13, no.1, pp.49–57, Jan./Feb. 2007.
- [31] M.M. Dummer, M.N. Sysak, A. Tauke-Pedretti, J.W. Raring, J. Klamkin, and L.A. Coldren, “Widely tunable separate absorption and modulation wavelength converter with integrated microwave termination,” *J. Lightwave Technol.*, vol.26, no.8, pp.938–944, April 2008.
- [32] A. Tauke-Pedretti, M.M. Dummer, M.N. Sysak, J.S. Barton, J. Klamkin, J.W. Raring, and L.A. Coldren,

- “Separate absorption and modulation Mach-Zehnder wavelength converter,” *J. Lightwave Technol.*, vol.26, no.1, pp.91–97, Jan. 2008.
- [33] M. Sysak, J. Raring, J. Barton, H. Poulsen, D. Blumenthal, and L. Coldren, “Extinction ratio regeneration, signal re-amplification (2R), and broadband wavelength switching using a monolithically integrated photocurrent driven wavelength converter,” *Opt. Express*, vol.14, no.23, pp.11348–11353, Nov. 2006.
- [34] M.T. Hill, H.J.S. Dorren, T. Vries, X.J.M. Leijtens, J.H. Besten, B. Smalbrugge, Y. Oei, H. Binsma, G. Khoe, and M.K. Smit, “A fast low-power optical memory based on coupled micro-ring lasers,” *Nature*, vol.432, no.11, pp.206–209, Nov. 2004.
- [35] M. Takenaka, M. Raburn, and Y. Nakano, “All-optical flip-flop multimode interference bistable laser diode,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.17, no.5, pp.968–970, May 2005.
- [36] M. Raburn, M. Takenaka, K. Takeda, X. Song, J.S. Barton, and Y. Nakano, “Integrable multimode interference distributed Bragg reflector laser all-optical flip-flops,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.18, no.13, pp.1421–1423, July 2006.
- [37] K. Takeda, M. Takenaka, M. Raburn, K. Kanema, J.S. Barton, X. Song, and Y. Nakano, “Dynamic operation of all-optical flip-flops with distributed Bragg reflectors for self-routing of 10-Gbit/s optical packets,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.46, no.3A, pp.1028–1032, March 2007.
- [38] K. Takeda, Y. Kanema, M. Takenaka, T. Tanemura, and Y. Nakano, “Polarization insensitive all-optical flip-flop using tensile-strained multiple quantum wells,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.20, no.22, pp.1851–1853, Nov. 2008.
- [39] H. Shimizu and Y. Nakano, “Monolithic integration of a waveguide optical isolator with a distributed feedback laser diode in the 1.5- μm wavelength range,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.19, no.24, pp.1973–1975, Dec. 2007.
- [40] H. Shimizu and Y. Nakano, “Fabrication and characterization of an InGaAsP/InP active waveguide optical isolator with 14.7 dB/mm TE mode nonreciprocal attenuation,” *J. Lightwave Technol.*, vol.24, no.1, pp.38–43, Jan. 2006.
- [41] T. Amemiya, H. Shimizu, M. Yokoyama, P.N. Hai, M. Tanaka, and Y. Nakano, “1.54- μm TM-mode waveguide optical isolator based on the nonreciprocal-loss phenomenon: Device design to reduce insertion loss,” *Appl. Opt.*, vol.46, no.23, pp.5784–5791, Dec. 2007.
- [42] G. Masini, G. Capellini, J. Witzens, and C. Gunn, “A four-channel, 10 Gbps monolithic optical receiver in 130 nm CMOS with integrated Ge waveguide photodetectors,” *Proc. Optical Fiber Communication Conference*, Paper PDP31, Anaheim, March 2007.
- [43] S.I. Bozhevolnyi, V.S. Volkov, E. Devaux, J. Laluet, and T.W. Ebbesen, “Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators,” *Nature*, vol.440, pp.508–511, March 2006.

(平成 21 年 1 月 7 日受付)



種村 拓夫 (正員)

平 13 東大・工・電子卒。平 18 同大学院博士課程了。同年より同電子工学科助手。平 19 より東大先端科学技術研究センター講師。III/V 族半導体光集積回路、光スイッチ、全光信号処理デバイス、フォトニックネットワーク技術の研究に従事。2005 IEEE/LEOS Graduate Student Award, 2006 エリクソン・ヤングサイエンティストアワード受賞。IEEE/LEOS 会員。



中野 義昭 (正員：フェロー)

昭 57 東大・工・電子卒。昭 59 同大学院修士課程了。昭 62 同博士課程了。工博。同年東大・工・電子助手, 昭 63 同講師, 平 4 同助教授, 平 12 同教授, 平 14 東大・先端科学技術研究センター教授, 現在に至る。この間, 分布帰還型半導体レーザの研究, 半導体光変調器/光スイッチ/光制御デバイスの研究, モノリシック光集積回路の研究, 化合物半導体エピタキシャル成長/プロセス技術の研究に従事。平 4 カリフォルニア大学サンタバーバラ校客員助教授。本会エレクトロニクスソサイエティ賞, 内閣府産学官連携内閣総理大臣賞, 市村学術賞, 応用物理学会光学論文賞などを受賞。エレクトロニクス実装学会常任理事, 応用物理学会評議員, IEEE LEOS 元公選理事, 電気学会, OSA 各会員。