

1-5 光エレクトロニクス，光通信を支える技術

Optoelectronics: Technologies Supporting Optical Communications

石川 浩

Abstract

現在の光通信を支える光エレクトロニクスとして，レーザ，受光素子，変調器，ファイバ，増幅器などの光デバイスについて初期から最近までの進展を振り返る．また，波長多重，多値変調などの多重化によるネットワークの超大容量化の動きや高度化するネットワークについて概観し，対応する集積化などのデバイス技術について今後の展望を議論する．

キーワード：光通信，光半導体デバイス，光ファイバ，光集積，シリコンフォトニクス

1. はじめに

今日，情報通信技術の発展で，情報化社会が実現され，更にビッグデータの活用やIoTなどが大きな関心を受けている．この情報化社会は，大容量の光通信が実現されることで進展してきた．今日，インターネットには平均して3Tbit/s程度の情報が飛び交い，更に年率40%の増加率を示している．この光通信は，1960年代のレーザの発明と低損失のファイバの提案を契機とし，1970年のGaAsレーザのCW発振⁽¹⁾，同時期の低損失ファイバの開発^{(2),(3)}などの研究をベースに本格的にスタートした．その後の半導体レーザ，光変調器，受光素子，ファイバ，光増幅器などの光コンポーネント技術，これらをシステム化する電子回路，変調方式，各種多重化技術などの不断の研究開発が行われ，システムの上位レイヤの技術開発もあいまって，今日の情報化社会を支える光通信ネットワークが構築された．

光通信を支える光エレクトロニクスは極めて幅広い技術の集積であり筆者がカバーできる範囲は狭い．ここで

は，筆者が関わってきた光デバイス技術を中心に狭い視野になるが進展を振り返り，今後の課題を展望する．まず，1970年代の初期から1990年代までの光通信の高速化と長距離化に向けたデバイスの開発を振り返る．次に，その後の各種多重化による超大容量化と最近の高度のネットワークへの進展を概観し，光デバイス技術の研究開発の課題と今後を議論する．

2. 高速化とデバイス技術の進展

光ファイバを実際に敷設して通信を行う世界初の現場試験が1978年から日本電信電話公社（現NTT）により東京都内で行われた．波長0.8 μm 帯で，ビットレートは32Mbit/sと100Mbit/sであった．その後，波長は低損失の1.3 μm 帯に移り，単一モードファイバを用いたビットレート400Mbit/s，中継間隔40kmの国内幹線系（1985年完成），280Mbit/sの日米間光海底ケーブルTPC-3（1989年）などが実用化された．1987年には，1.55 μm 帯で1.6Gbit/sの幹線系，1990年後半には10Gbit/sのシステムが実用化された．この時期の光通信の中心的な課題は高速化であった．光ファイバには分散と呼ばれる波長による光の伝搬速度の違いがあり，高速の信号を伝送すると光波形がなまり伝送距離が制限される．このため，高速化にはレーザのスペクトル幅を狭くしていくことが必要であった．受光素子では高速化と

石川 浩 正員：フェロー 国立研究開発法人産業技術総合研究所電子光技術研究部門

E-mail hiroshi-ishikawa@aist.go.jp
Hiroshi ISHIKAWA, Fellow (Electronics and Photonics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba-shi, 305-8568 Japan).

電子情報通信学会誌 Vol.100 No.9 pp.907-912 2017年9月
©電子情報通信学会 2017

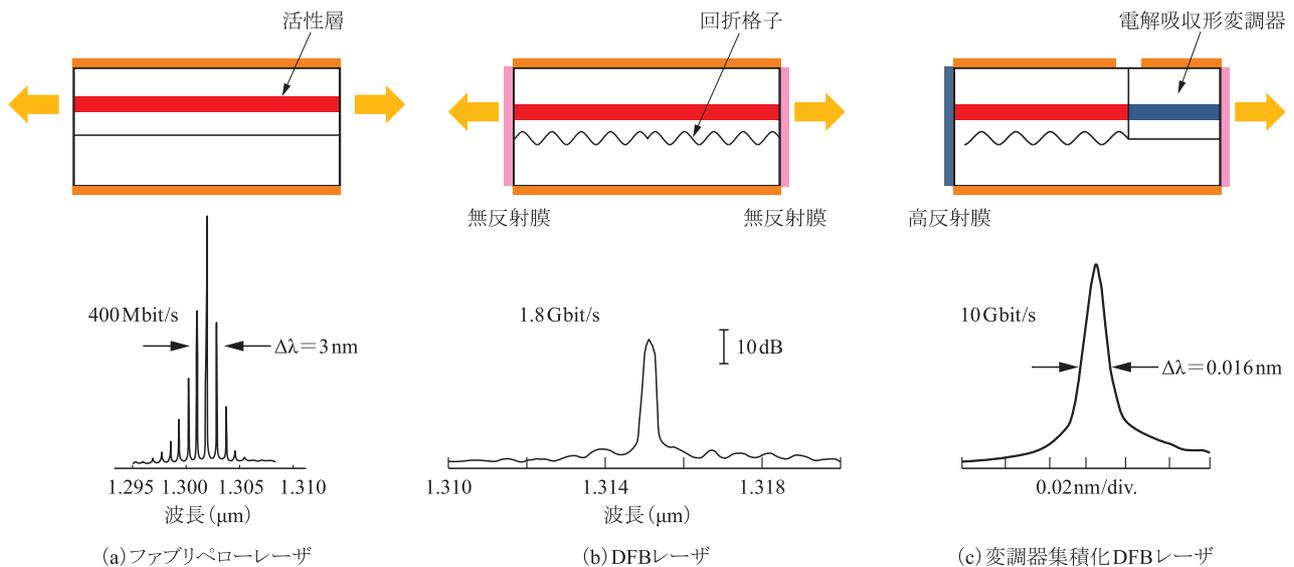


図1 半導体レーザーの軸方向の断面構造と変調時のスペクトル例 図中に変調時のスペクトルを示す。(a)は分光器で測定し縦軸は線形、(b)はスペクトルアナライザによる測定で縦軸はdB、(c)は高分解を得るためにエタロン測定し縦軸は線形である。DFBレーザーでは変調すると単一のスペクトルであるが若干のスペクトル広がりがある。変調器集積化DFBレーザーでは10 Gbit/sで変調してもスペクトル広がり半値幅は0.016 nmと極めて狭い。

高感度化が要請された。ファイバでも損失の最も少ない1.55 μm帯で分散がゼロになる分散シフトファイバが開発され、更にファイバ増幅器の出現が長距離化に大きなインパクトを与えた。

まず光源である半導体レーザーの進化を振り返ってみよう。図1に半導体レーザーの進化の歴史としてファブリペローレーザー、分布帰還形レーザー(DFB; Distributed Feedback Laser)、変調器集積化DFBレーザーの共振器方向の断面模式図と変調時のスペクトルを示す。

初期の半導体レーザーは図1(a)に示すようにファブリペロー形のレーザーで、マルチスペクトル発振する。変調時に1本1本のスペクトルがランダムに変動することによるモード分配雑音の問題となり、これを低減するには横モードの安定化が必要であった。更に電流を効率良く導波路領域に閉じ込め、低消費電力化する必要があった。これを実現する各種の構造のレーザーが開発された。その中で、0.8 μm帯のGaAlAs/GaAs系レーザーで開発された塚田によるBH(Buried Heterostructure)構造⁽⁴⁾が最も基本的な構造であった。本格的な光通信が始まった1.3 μm帯では、レーザーに適した材料系としてInGaAsP/InPが選択され⁽⁵⁾、各社が競って独自性のあるBH構造のレーザーを開発した^{(6)~(8)}。これらのレーザーは400 Mbit/sの幹線系、280 Mbit/sの初めての太平洋を横断する光海底ケーブルTPC-3、296 Mbit/sの大西洋横断光海底ケーブルTAT-8などで使用された。海底ケーブルへの適用に関しては信頼性が大きな課題で、InGaAsP/InP系レーザーの高い信頼性が確立された⁽⁹⁾。

1 Gbit/s以上の高速を狙うと、マルチスペクトルの

レーザーでは限界があった。この観点から、東工大の末松教授(現名誉教授)は、変調しても単一スペクトルで発振する動的単一モードレーザーの必要性を1970年代から提唱し研究を進めていた⁽¹⁰⁾。動的単一モードレーザーとして、図1(b)に示すDFBレーザーを各社が競って開発した^{(11)~(13)}。基板に回折格子を刻み、その上にクラッド層、活性層を液相エピタキシャル成長するという製法であった。単一スペクトルで発振させるため回折格子にはλ/4の位相シフトも設けられた。筆者らもDFBレーザーの開発を行っていたが、理想的な構造を作っても安定な単一スペクトル発振の歩留まりが低く苦慮していた。雙田らは、この原因がレーザーの軸方向の空間的なホールバーニングであることを明らかにし、最適な回折格子と光の結合を明らかにした⁽¹⁴⁾。これにより高歩留まりでDFBレーザーを製作することが可能になった。1.55 μm帯で分散がゼロになる分散シフトファイバが敷設されたことから、これらのDFBレーザーは1.55 μm帯の1.6 Gbit/s、2.4 Gbit/sの幹線系で使われた。

より高速の10 Gbit/sに向けてはレーザーが単一スペクトルであっても、直接変調では変調に伴う屈折率の変動で、1本のスペクトル幅が広がるため、外部変調方式が検討された。図1(c)に示すような、電界吸収形の変調器とDFBレーザーをモノリシックに集積化したレーザーが開発された⁽¹⁵⁾。10 Gbit/sでの変調時のスペクトル幅は0.016 nmで極めて狭い。並行して、Lithium Niobate(LN)のマッハツェンダ形変調も開発された⁽¹⁶⁾。スペクトル幅の広がりにはLN変調器の方が電界吸収形変調器より小さい。このため、デバイスの小形化低コスト化の

要求の高い中距離の伝送では変調器集積化DFBレーザが、高品質の伝送が必要な長距離伝送ではLN変調器が使われるようになった。

受光素子では、pin-PD (Photodiode) に加えて0.8 μm 帯ではSi-APD (Avalanche Photodiode), 1.3~1.5 μm 帯ではInGaAs/InP APDが開発された。APDが高速かつ低雑音で動作するためにはイオン化率比というパラメータが大きい材料が必要である。1.3~1.5 μm 帯が受信可能な半導体ではSiに比べてこの値が小さく、レーザと同じInGaAsP/InP系で最大限の特性を得る努力が行われた。高速、低雑音で、高い信頼性を得るために、層構造、表面パッシベーション、ガードリング構造等の工夫が行われた。利得・バンド幅積が100前後のAPDが実用化された^{(17), (18)}。APDはアバランシ増倍機構を利用するため、pin-PDに比べ時間応答に限界があるが、小形低コストで受信感度を稼ぐために用いられている。40 Gbit/sで使えるAPDも開発された。

1980~1990年に長距離化を目指したコヒーレント通信^{(19), (20)}の研究が行われた。信号光とローカル光でビートを取って検波することで直接検波に比べて10~20 dBの受信感度の増大が得られ、伝送距離を長くすることができる。筆者らもコヒーレント通信用にスペクトル純度の高いスペクトル線幅500 kHzで波長可変なレーザを開発した⁽²¹⁾。NTTは海底ケーブル240 kmで2.5 Gbit/sのコヒーレント通信の現場試験を行い、安定なコヒーレント通信が行えたことを1991年に報告している⁽²²⁾。しかし、同時期にファイバ増幅器が出現し、伝送距離の長距離化ができるため、コヒーレント通信は実用化されることはなかった。筆者にとってファイバ増幅器は突然現れたという印象がありインパクトが大きかった。Erをファイバのコアにドーピングして、0.98 μm 、あるいは1.48 μm の半導体レーザで励起して光を増幅する^{(23), (24)}。これにより、幹線系や光海底ケーブルの中継間隔が長距離化された。また、他の希土類元素を用いて帯域が広げられ、更に励起波長を変えることで広い波長帯域をカバーでき、分布的な増幅で低雑音の増幅が可能になるファイバラマン増幅が実用化された⁽²⁵⁾。

この時期、光半導体デバイス作製の結晶成長技術は初期の液相成長から量産性の高いMOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 技術へと進み、組成、膜厚、結晶品質、量産性が飛躍的に向上した。これにより量子井戸やひずみ量子井戸、超格子を導入することが可能となり、レーザや受光素子の性能が大きく向上した。InGaAlAs系の材料の導入もデバイス性能の向上に大いに役立った。

3. 超大容量化とデバイス技術の進展

1990年代に入って米国で波長多重による大容量化の研究が進展していた。MONET (Metropolitan Optical Network Project) というプロジェクトで、高密度波長多重 (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) と、回線に光信号を加えたり、取り出したりするOADM (Optical Add/Drop Multiplexer) を狙ったものである。米国では通常分散のファイバを使っていたため1.55 μm 帯で高速化ができず、WDMを使わざるを得ないという状況があった。加えて、日本に遅れた米国がWDM技術をてこに巻き返そうという大きな戦略もあったと言われている。日本でも、波長可変チューナブルレーザを複数個集積化したレーザ^{(26), (27)}や、PLC (Planar Lightwave Circuit) というシリカ導波路⁽²⁸⁾の開発とこれを用いたAWG (Arrayed Waveguide Grating) 分波器などのコンポーネントやハイブリッド集積技術、広帯域のファイバンプなどの強みを生かし、2000年頃までに、DWDMで300 Gbit/sのシステムが実用化された⁽²⁵⁾。また、DWDMをアクセス系に導入して、柔軟なネットワークが実用化されると同時に更なる大容量化も進んだ。

2004年頃から、コヒーレント光通信が多値変調という多重化の方式として復活した^{(29), (30)}。光の振幅と位相の両方を使い信号を送る。多値の限界を極める一つのパルスに11 bitの情報を乗せる多値伝送も報告された⁽³¹⁾。このコヒーレント多値通信には、1990年代にコヒーレント通信用に開発された狭線幅レーザ、バランス形pin受光器などの技術が役立つことになった。多値変調のためには、LNで複数のマツハツエンダ形変調器を組み合わせた変調素子が開発された⁽³²⁾。受信側では、PLCを用いたハイブリッド集積による受信機などが開発された⁽³³⁾。また、インパクトが大きかったのは、東大の菊池教授が主導したDSP (Digital Signal Processing) の技術であった^{(30), (33)}。多重分離、誤り訂正、偏波も含む分散補償などがLSIでデジタル的に行えるようになり、デジタルコヒーレント伝送として25 Gbit/sをベースとした100 Gbit/sのシステムが実用化された。400 Gbit/s、600 Gbit/sのシステムの検討も進んでいる。日本メーカーが連携して、DSP用LSIを開発し世界で大きなシェアをとった。

これらの多重化により、1本のファイバで実験的にはおよそ100 Tbit/sの非線形シャノン限界に近い情報を送ることも可能になり、更に、一層の大容量化を目指して多芯ファイバなど各種の空間多重の研究が盛んに行われている。

4. システムの進化と集積化

2010年代に入って、システム構成も複雑になり幾つかの流れが出てきた。一つは、ネットワーク資源をいかに柔軟にかつ効率的に使うための技術で、ハードウェアレベルでは、クロスコネクタ、波長を使い任意の方向にルートの切換が可能でCDC (Colorless Directionless Contentionless)-ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer) など、上位レイヤでは、SDN (Software Defined Network), NFV (Networking Functions Virtualization) などのキーワードで現されるようにネットワークのハードウェアを資源とみなして、それをソフトウェアでいかに効率良く利用するかという方向に開発が進んでいる。二つ目は、超大容量の情報を低消費電力で扱えるようにすることで、電子ルータでパケット処理すると消費電力が大き過ぎる。光スイッチを用いてダイナミックにパスルーチングを行い桁で低消費電力化することも追求されるようになった⁽³⁴⁾。三つ目は、機器レベルの動向で、従来の光ノードは全ての機能をまとめたものであったが、トランスポンダ、スイッチ、ROADM、増幅器など機能ごとに分けて集約し、マルチベンダに対応でき、更に必要に応じてそれぞれの部分を増強できるディスアグリゲーション (Disaggregation) が進行している。ここで使われるデバイス、モジュールは必然的にコモディティ化していく。そして、四つ目は、光通信が、データセンター内のネットワーク、サーバ間、チップ間の光インタコネクションへと範囲が広がろうとしていることである。

これらの進展に対応して、当然ながら、これらデバイスやモジュールは小形、高機能、そして低価格であることが要請される。このためには集積化が必須となる。これまで、ハイブリッド集積は、DWDM やアクセス系、デジタルコヒーレント通信で行われてきた。加えて、多くの部分をモノリシック化することができれば、一層

小形・低コストになる。モノリシック集積の流れは、米国が先導した。2011年には Infinera 社が InP 系のモノリシック集積化デバイスに 400 以上の機能を集積化し、チップ当たり 1 Tbit/s のトランスミッタとレシーバを報告した⁽³⁵⁾。また、2004年に、米国の EPIC (Electronic and Photonic Integrated Circuits) プロジェクトが企業、大学の連携で発足、SOI (Silicon on Insulator) 基板を用いて微細なシリコン導波路を形成して、光デバイス、電子回路などをモノリシックに集積するシリコンフォトニクスを開発を進めた⁽³⁶⁾。この中で、Luxtera 社は、レーザ以外を電子回路も含めてモノリシックに集積した 10 Gbit/s のトランシーバを開発した⁽³⁶⁾。この技術は、架間やブレード間を接続する AOC (Active Optical Cable) に適用されている。その後、シリコンフォトニクスの技術はデジタルコヒーレントの 100 Gbit/s トランシーバの開発へと進み⁽³⁷⁾、更に高速の超小形トランシーバへと開発が進んでいる。シリコンフォトニクスは CMOS のラインで生産できるのが売りであるが、ヨーロッパには IMEC (Interuniversity Microelectronics

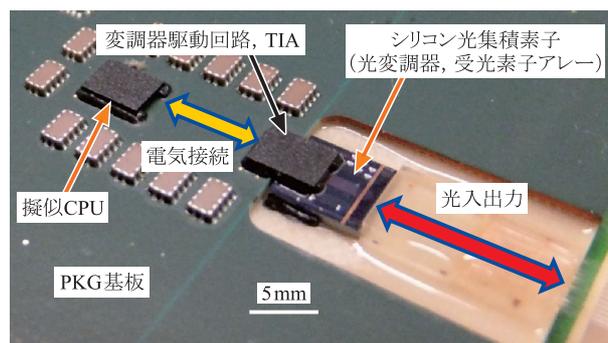


図2 ハイブリッド集積の例 シリコンフォトニクスによる変調器・受光素子アレーの光回路と CMOS の変調器駆動回路並びに TIA とのハイブリッド集積による CPU の光入出力トランシーバ⁽³⁹⁾。25 Gbit/s×6 ch の容量。小形に集積されていることが分かる。

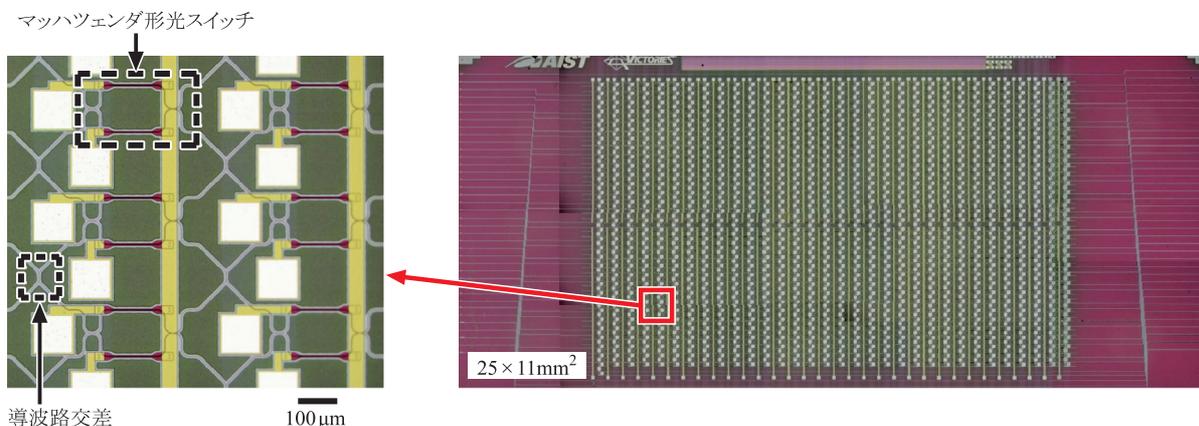


図3 シリコンフォトニクスによる 32×32 の光スイッチ⁽⁴⁰⁾ 1,024 個のマッハツェンダ形光スイッチと 961 の導波路の交差で構成され、25 mm×11 mm の領域に集積されている。シリコンフォトニクスで高密度の光集積が可能になる。

Centre), シンガポールの IME (Institute of Microelectronics) などがファウンドリーとして機能し, 米国でもファウンドリーが整備され, 最近では AIM Photonics (The American Institute for Manufacturing Integrated Photonics) がエコシステムの構築を目指して発足している。

日本では現在, 企業は海外のファウンドリーを使ってシリコンフォトニクスデバイスの開発を行っている。加えて, 国のプロジェクトでシリコンフォトニクスと化合物デバイスのハイブリッド集積による光インタコネクション用の集積化モジュールの開発が行われている⁽³⁸⁾。図2にその中で開発されているものの一つとして25 Gbit/s, 6チャンネルのトランシーバの写真を示す⁽³⁹⁾。また, ダイナミック光パズネットワークのプロジェクト⁽³⁴⁾では, 図3に示すシリコンフォトニクスによる大規模マトリクススイッチ⁽⁴⁰⁾の開発が行われている。これらのシリコンフォトニクスのデバイスは産総研の施設で製作されたもので, この施設のファウンドリーとしての整備も始まっている。しかし, 日本はこの分野で出遅れており, 既に製品化し, 更なる展開を進めている米国の勢いに比べると心もとないと言わざるを得ない。

5. 展望とまとめ

1990年代初頭までの光デバイスの開発は目標が明確であり, 開発されたデバイスが直ちにシステムで使用された。しかし, 今日, システムの要求に合うデバイス, モジュールを, 低価格で, タイムリーに実現できなければ, 実際に使われることはない。有効な開発を行うには, 大学の研究者を含むデバイス研究者, 技術者がシステムの現場の動向をよく知っておく必要がある。また, デバイスをハイブリッドあるいはモノリシックに集積化し小形・低価格で超大容量の信号を扱える機能を実現することが必須である。これを進めるには, 大きな資源の投入が必須である。米国では企業がこれを強力に進めている。しかし, 日本では企業1社でこれを賄うのは難しい。現在, 一つの試みとして企業11社と産総研が連携して, 「光デバイス基盤技術イノベーション研究会 (PHOENICS)」と名付けられたハイブリッド集積を目指すコンソーシアムが動いている⁽⁴¹⁾。米国に対抗していくには, このような試みを成功させて, 光集積のエコシステムを構築していく必要がある。

イノベティブなデバイスの開発も課題であるが, 一つのデバイスの役割は小さくなっている。しかも, 使える基本的な物理や材料系はおおむね出尽くした感がある。光非線形信号処理デバイス, フォトニック結晶, 量子ナノ構造, 新材料などの基礎的研究が1990年以降盛んに行われて, 筆者もこれらに関わってきた。しかし, 物理的面白さとは裏腹に, インパクトを与える技術には

なっていない。シリコンフォトニクスを振り返ると, Si光源, 光非線形などの基礎研究が源流である⁽³⁶⁾。Si光源はいまだに成功していないが, 基礎的研究であったものが, 集積化の要の技術へと成長して現在大きなインパクトを与えている。基礎研究は実を結ぶまで長期間耐える必要がある。また, 実を結ぶにはテーマ設定が重要であろう。新しい光デバイスができるのであれば, 低コストで集積化できるという要請を満たす必要があり, そのためのプラットフォームとなるような新技術の出現を期待したい。

文 献

- (1) I. Hayashi, M.B. Panish, P.W. Foy, and S. Sumaki, "Junction lasers which operate continuously at room temperature," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 17, no. 3, pp. 109-111, 1970.
- (2) D.B. Keck, R.D. Maurer, and P.C. Schlutz, "On the ultimate lower limit of attenuation in glass waveguide," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 22, no. 7, pp. 307-309, 1973.
- (3) T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka, and T. Miyahsita, "An ultimately low-loss single-mode fibre at 1.55 μm ," *Electron. Lett.*, vol. 15, no. 4, pp. 106-108, 1979.
- (4) T. Tsukada, "GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs buried-heterostructure injection lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 11, pp. 4899-4906, 1974.
- (5) Y. Suematsu, "Long-wavelength optical fiber communications," *Proc. IEEE*, vol. 71, no. 6, pp. 692-712, 1983.
- (6) M. Hiraio, A. Doi, S. Tsuji, M. Nakamura, and K. Aiki, "Fabrication and characterization of narrow stripe InGaAsP/InP buried heterostructure lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 8, pp. 4539-4540, 1980.
- (7) H. Ishikawa, H. Imai, T. Tanahashi, Y. Nishitani, M. Takusagawa, and K. Takahei, "V-grooved substrate buried heterostructure InGaAsP/InP laser," *Electron. Lett.*, vol. 17, no. 13, pp. 465-467, 1981.
- (8) I. Mito, M. Kitamura, K. Kobayashi, S. Murata, M. Seki, Y. Odagiri, H. Nishimoto, M. Yamaguchi, and K. Kobayashi, "InGaAsP double-channel-planar-buried-heterostructure laser diode (DC-PBH) with effective current confinement," *J. Lightwave Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 195-201, 1983.
- (9) O. Fujita, Y. Nakano, and G. Iwane, "Reliability of semiconductor lasers for undersea optical transmission systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 3, no. 6, pp. 1211-1216, 1985.
- (10) Y. Suematsu, S. Arai, and K. Kishimoto, "Dynamic single-mode semiconductor lasers with a distributed reflector," *J. Lightwave Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 161-176, 1983.
- (11) T. Matsuoka, H. Nagai, Y. Itaya, Y. Noguchi, Y. Suzuki, and T. Ikegami, "CW operation of DFB-BH GaInAsP/InP lasers in 1.5 μm wavelength region," *Electron. Lett.*, vol. 18, no. 1, pp. 27-28, 1982.
- (12) M. Kitamura, S. Murata, I. Mito, and K. Kobayashi, "Low-threshold and high temperature single-longitudinal mode operation of 1.55 μm -band DFB-DC-PBH LDs," *Electron. Lett.*, vol. 20, no. 14, pp. 595-596, 1984.
- (13) H. Ishikawa, H. Soda, K. Wakao, K. Kihara, K. Kamite, Y. Kotaki, M. Matsuda, H. Sudo, S. Yamakoshi, S. Isozumi, and H. Imai, "Distributed feedback laser emitting at 1.3 μm for Gigabit communications systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 848-855, 1987.
- (14) H. Soda, Y. Kotaki, H. Sudo, H. Ishikawa, S. Yamakoshi, and H. Imai, "Stability in single longitudinal mode operation in GaInAsP/InP phase-adjusted DFB lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 23, no. 6, pp. 804-814, 1987.
- (15) H. Soda, M. Furutsu, K. Sato, N. Okazaki, S. Yamazaki, I. Yokata, T. Okiyama, H. Nishimoto, and H. Ishikawa, "High-power semi-insulating BH structure monolithic electro-absorption modulator/DFB laser light source operating at 10 Gb/s," *IOOC '89*, no. 20PDB-5, pp. 46-47, 1989.
- (16) T. Namiki, N. Mekada, H. Hamano, T. Yamane, M. Seino, and H. Nakajima, "Low-drive-voltage Ti:LiNbO₃ Mach-Zehnder modulator

- using a coupled line," OFC 1990, no. TuH4, 1990.
- (17) Y. Kito, H. Kuwatsuka, T. Kumai, M. Makiuchi, T. Uchida, O. Wada, and T. Mikawa, "High-speed flip-chip InP/InGaAs avalanche photodiodes with ultralow capacitance and gain-bandwidth products," IEEE Trans. Photonics Tech. Lett., vol. 3, no. 12, pp. 1115-1116, 1991.
- (18) I. Watanabe, T. Nakata, M. Tsuji, K. Makita, T. Torikai, and K. Taguchi, "High-speed, high-reliability planar-structure superlattice avalanche photodiodes for 10-Gb/s optical receivers," J. Lightwave Technol., vol. 18, no. 12, pp. 2200-2207, 2000.
- (19) Y. Yamamoto, "Receiver performance evaluation of various digital optical modulation-demodulation systems in the 0.5-10 μm wavelength region," IEEE J. Quantum Electron., vol. 16, no. 11, pp. 1251-1259, 1980.
- (20) T. Okoshi, "Recent advances in coherent optical fiber communication systems," J. Lightwave Technol., vol. 5, no. 1, pp. 44-52, 1987.
- (21) Y. Kotaki, S. Ogita, M. Matsuda, Y. Kuwahara, and H. Ishikawa, "Tunable, narrow-linewidth and high-power $\lambda/4$ -shifted DFB laser," Electron. Lett., vol. 25, no. 15, pp. 990-992, 1989.
- (22) T. Imai, N. Ohkawa, Y. Hayashi, and Y. Ichihashi, "Polarization diversity detection performance of 2.5-Gb/s CPFSK regenerators intended for field use," J. Lightwave Technol., vol. 9, no. 6, pp. 761-769, 1991.
- (23) R.I. Laming, M.C. Farries, P.R. Morkel, L. Reekie, D.N. Payne, P.L. Scrivener, F. Fontana, and A. Righetti, "Efficient pump wavelength of erbium-doped fiber optical amplifier," Electron. Lett., vol. 25, no. 1, pp. 12-14, 1989.
- (24) M. Nakazawa, Y. Kimura, and K. Suzuki, "Efficient Er^{+3} -doped optical fiber amplifier pumped by a 1.48 μm InGaAsP laser diode," Appl. Phys. Lett., vol. 54, no. 4, pp. 295-297, 1989.
- (25) 山田 誠, "広帯域光ファイバ増幅技術の概要," NTT 技術ジャーナル, vol. 16, no. 4, pp. 8-10, Oct. 2004.
- (26) M. Bouda, M. Matsuda, K. Morito, S. Hara, T. Watanabe, T. Fujii, and Y. Kotaki, "1.55- μm wavelength-selectable microarray DFB-LD's with monolithically integrated MMI combiner, SOA, and EA-modulator," OFC 2000, no. TuL1-1, 2000.
- (27) H. Ishi, K. Kasaya, H. Oohashi, Y. Shibata, and H. Yasaka, "Widely wavelength-tunable DFB laser array integrated with funnel combiner," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 13, no. 5, pp. 1089-1094, 2007.
- (28) M. Kawachi, "Silica waveguides on silicon and their application to integrated components," Opt. Quantum Electron, vol. 22, no. 5, pp. 391-416, 1990.
- (29) M. Taylor, "Coherent detection method using DSP for demodulation of signal and subsequent equalization of propagation impairments," IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 16, no. 2, pp. 674-676, 2004.
- (30) S. Tsukamoto, D.-S. Ly-Gagnon, K. Katoh, and K. Kikuchi, "Coherent demodulation of 40-Gbit/s polarization-multiplexed QPSK signals with 16-GHz spacing after 200-km transmission," OFC/NFOEC 2005, no. PDP 29, 2005.
- (31) S. Beppu, K. Kasai, M. Yoshida, and M. Nakazawa, "2048 QAM (66Gb/s) single-carrier coherent optical transmission over 150 km with a potential SE of 15.3bit/s/Hz," Opt. Express, vol. 23, no. 4, p. 4960, 2015.
- (32) A. Kanno, T. Sakamoto, A. Chiba, T. Kawanishi, K. Higuma, M. Sudou, and J. Ichikawa, "120-Gb/s NRZ-DQPSK signal generation by a thin-lithium-niobate-substrate modulator," IEICE Electronics Express, vol. 17, no. 11, pp. 817-822, 2010.
- (33) 鈴木 扇太, 宮本 裕, 富沢 将人, 坂野 寿和, 村田 浩一, 美野 真司, 柴山 充文, 渋谷 真, 福地 清, 尾中 寛, 星田 剛司, 小牧 浩輔, 水落 隆司, 久保 和夫, 宮田 好邦, 神尾 享秀, "光通信ネットワークの大容量化に向けたデジタルコヒーレント信号処理技術の研究開発," 信学誌, vol. 95, no. 12, pp. 1110-1116, Dec. 2012.
- (34) 並木 周, 石井 紀代, 高野 了成, 工藤 知宏, 来見 田淳也, 上塚 尚登, 池田 和浩, 河島 整, 井上 崇, 黒須 隆行, 佐藤 健一, "超低エネルギーダイナミック光バスネットワーク," 信学誌, vol. 99, no. 6, pp. 563-580, June 2016.
- (35) F. Kish, R. Nagarajan, M. Kato, P. Evans, S. Corzine, M. Ziari, A. Nilsson, J. Rahn, D. Lambert, A. Dentai, V. Lal, M. Fisher, M. Kuntz, A. James, R. Malendevich, G. Goldfarb, H. Tsai, P. Samra, H. Sun, J. Stewart, T. Butrie, J. McNicol, K. Wu, M. Reffle, and D. Welch, "Coherent large scale InP photonic integrated circuits," ECOC vol. 2, Saleve. 5, 2011.
- (36) R. Soref, "The past, present, and future of silicon photonics," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 12, no. 6, pp. 1678-1687, 2006.
- (37) C. Doerr, L. Chen, D. Vermeulen, T. Nielsen, S. Azemati, S. Stulz, G. McBrien, X.-M. Xu, B. Mikkelsen, M. Givehchi, C. Ramussen, and S.-Y. Park, "Single-chip silicon photonics 100-Gb/s coherent transceiver," OFC2014, Postdeadline Papers, no. Th5C. 1, 2014.
- (38) 中村 隆宏, "シリコンフォトニクスデバイスの最新技術動向," 信学誌, vol. 99, no. 11, pp. 1083-1088, Nov. 2016.
- (39) A. Hayakawa, M. Kibune, A. Toda, S. Tanaka, T. Simoyama, Y. Chen, T. Akiyama, S. Okumura, T. Baba, T. Akahoshi, S. Ueno, K. Maruyama, M. Imai, J. Jiang, P. Thachile, T. Riad, S. Sekiguchi, S. Akiyama, Y. Tanaka, K. Morito, D. Mizutani, T. Mori, T. Yamamoto, and H. Ebe, "A 25 Gbps silicon photonic transmitter and receiver with a bridge structure for CPU interconnections," OFC2015, no. Th1G. 2, 2015.
- (40) K. Tanizawa, K. Suzuki, M. Toyama, M. Ohtsuka, N. Yokoyama, K. Matsumaro, M. Seki, K. Koshino, T. Sugaya, S. Suda, G. Cong, T. Kimura, K. Ikeda, S. Namiki, and H. Kawashima, "Ultra-compact 32 x 32 strictly-non-blocking Si-wire optical switch with fan-out LGA interposer," Opt. Express, vol. 23, no. 13, pp. 17599-17606, 2015.
- (41) 並木 周, 鍛塚 治彦, 河島 整, 井上 崇, 山田 浩治, 森 雅彦, "2030 年を見据えた光デバイスの展望—ポストムーア時代に向けて—," 信学誌, vol. 99, no. 11, pp. 1060-1065, Nov. 2016.

(平成 29 年 3 月 31 日受付)



いしかわ ひろし
石川 浩 (正員:フェロー)

1972 富士通研究所入社, フェムト秒テクノロジー研究機構を経て 2004 産業技術総合研究所, 現在, 同名誉リサーチャー・客員研究員, 工博. 発明協会関東地方発明表彰奨励賞 (1991), SSDM Paper Award (1998) ほか各受賞. IEEE, 応用物理学会各フェロー.