

わが国の光ファイバ通信研究（前編）



I はじめに

光は人類が制御出来る周波数が最も高い電磁波として、光通信などの情報通信の分野で広く用いられている。ここでは、光ファイバ通信の発展を生み出した研究について、情報・通信技術を発展させて新しい情報通信技術（ICT）社会を生み出したという観点から振り返って調べてみたい。現在、光ファイバ通信は多様な使われ方をしているので、紙面の関係上、通信に於いて世界を結ぶ役割を果たしている大容量長距離光ファイバ通信を中心に要約した。出来るだけ多くの研究についての記述を試みたが、紙面の関係と浅見にして追跡出来なかった研究についてはご容赦を頂きたい。

参考資料について 本文は光ファイバ通信に関する国内の学術的研究を概観するために、関連が強い電子情報通信学会の業績賞、{IEICE業績賞}、の中の光通信関係事項を目安としてすべて参照し、また国際的な視野で研究成果を収録する閲覧が容易な{日本国際賞}と{京都賞}の関連研究を引用し、さらに紙面の関係で通常使われている学術文献は{IEICE 業績賞}との重複を避け、これらを補間するのに必要な最小限度の引用に留めた。

なお、{IEICE業績賞}の内容は、主要学会が表彰してきた代表的な研究・開発を日本学術振興会が卓越研究成果公開事業（通称「発明と発見のデジタル博物館」）によってデータベース（DB）として国立情報学研究所からネットワーク上で公開している卓越研究の中の当該学会関係DBで、誰でも容易にネットワーク上で検索出来るものである。

II 知識情報を担う印刷情報と映像情報そして通信技術

2-1 文明を支える知識情報を担う印刷文書 四大大河文明発生以来、知識情報は光の反射模様で認識される文書の形で、石や革、木、竹、そして紙などに記録され、利用されてきた。そして1450年頃のJohanes Gutenberg(独)による活版印刷の開発により紙文書が実質的に量産されるようになって、知識情報がより安価に広く交換・活用され、現代文明展開の基盤となった。

2-2 瞬時に情報を伝える電気通信技術 一方、瞬時に遠隔連絡や緊急情報などを伝える通信の歴史は古く、光を用いる通信としては、ウイंक、のろし、灯台、

BC500頃のDarius大王の通信ネットワークにおける太陽光反射通信、船舶間通信、1791年のClaude Chappe(佛)によりフランスで実用された"Semaphore"、1880年のAlexander Graham Bell(米)の"Photophone"の着想、1936年の関杜夫と根岸博(日)の光路を反射鏡で曲げるガラスロッド通信の特許出願など多種多様な発想や試みがあった。

他方、レーザが出現するまで、人類が制御出来た最高の周波数の電磁波として、電波や高周波を用いる電気通信が広く用いられてきた。すなわち、1844年頃に始まったSamuel Morse(米)による電信、1876年のBellによる電話、そして1896年のGuglielmo Marconi(伊)による無線通信などが、情報容量は極く少量ながら、即時の双方向通信として社会の連携とダイナミズムを生み出してきた。

2-3 紙媒体に匹敵する情報量を担う電子映像 他方では、1839年のLouis Daguerre(佛)により初の銀板写真が発明され、映像が即刻作成されてフィルムや紙媒体として記録されたのみならず、紙文書の保存・流通にも用いられてきた。また、1926年の浜松高等工業の高柳健次郎(日)による初の電子映像表示、1928年頃のVladimir Zworykin(米)による撮像管、1968年のGeorge H. Heilmeyerらによる液晶パネル表示の実現、Willard Boyle(米)らによる1969年の撮像固体素子CCDの発明、そしてその後に行われた1977年の東北大学の岩崎俊一(日)による超大容量記録の発明{垂直磁気記録方式の発明、開発、1978 IEICE業績賞}、{2010日本国際賞}などにより、知識情報を含む大量の文字情報や映像が電子的に作成・記録され、電子表示できるようになった。そして、TV放送が始まり、一方向ではあるが電子映像が個人へ伝えられるに至った。さらに、トランジスタ、LSIやMicro-Processor{1997 京都賞}、電子計算機の開拓などを踏まえて、1970年代にはAlan Curtis Kay(米)らによりPCが発展して電子映像情報が個人的に手軽に活用され始めた{2004 京都賞}。しかし当時は、情報の容量が大きい電子的知識情報を、伝送容量が小さな電気通信により双方向で同時活用することは困難であった。

2-4 大容量長距離光ファイバ通信の開拓により電子映像が即時活用されるICT社会が出現 現代の情報通信ネットワークの基盤となったインターネットは、Vinton CerfとRobert KahnによりTCP-IPプロトコル(米)が

著者:末松 安晴

東京工業大学名誉教授 (元学長)、高知工科大学 (元学長) と国立情報学研究所 (元所長) の各名誉教授

略歴: 半導体レーザーを中心に、光ファイバー通信の先駆的な研究を行う。昭和58年ワルデマ・ポールセン金メダル (デンマーク)、平成8年紫綬褒章受章、平成26年日本国際賞受賞、平成27年文化勲章受章。

1973年に統合された [2008 日本国際賞] のを契機とし、さらに世界に分散する大容量データを活用できるサーバー、World Wide Web (WWW) が1991年にTimothy Berners-Lee (英) により公開されて [2003 日本国際賞]、情報通信技術としての機能が飛躍的に高まった。そして、物理網としての光ファイバ通信の飛躍的な進歩により、このインターネットの目覚ましい発展がなされた。1990年前後の大容量長距離光ファイバ通信の出現は、インターネットの発展を支えて、大容量情報の電子映像を双方向で瞬時に活用できる人の営みの形態を生みだし、新しい社会、ICT文明、を生み出す原動力となった。

III 連続動作の半導体レーザーと低損失光ファイバが出現

1953年に現在用いられている型の光ファイバの原型が開拓され、1960年にレーザーが出現して光ファイバ通信が実現する素地となった。

3-1 レーザの出現 1917年にAlbert Einstein(瑞西)は黒体輻射スペクトルの説明のために電磁波の吸収・放出に関わる分子の誘導放出の考えを発案した^[1]。1953年にJanos von Neumann(米)は、初めて、電流注入で逆転分布させた半導体pn接合で誘導放出により光の増幅ができることを講義で具体的に明らかにした^[2](John Bardeen収録)。1958年に、Arthur L. Schawlow と Charles H. Townes(米)が光メーザ(現在のレーザー(Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation))の概念を提案^[3]したのを契機に、1960年にTheodore H. Maiman(米)により初のレーザー、ルビー・レーザーが実現 [1987 日本国際賞]、翌年にHe-Neガスレーザー(米)と続き、人類は制御出来るコヒーレントな光を得た。そして1962年にGaAsを用いたホモ接合のGaAs半導体レーザーがGE (Robert N. Hall et al)、IBM(Marshall I. Nathan et al)、MIT(Ted M. Quist et al)、並びにGaAsPレーザ

がGE(Nick Holonyak [1995 日本国際賞] et al) の4グループ(米)により、低温でパルス動作ながら初めて実現し、学術分野では光への関心が高まっていった。なお、1954年に上記のTownesらは分子の誘導放出によるマイクロ波の増幅器、メーザを開発し、レーザへの発展の素地となった。1957年には、東北大の渡辺寧と西澤潤一は半導体メーザを特許出願した。

3-2 光ファイバの出現 他方、ガラスを熱して細く引いただけの単純なベア・コアの光ファイバはガラス細工に付随してエジプト時代から知られていたようで、中世ベニスでは装飾用の光ファイバ・フラワーなどとして商品化され、その後は光ファイバが計測用などにも用いられていたが光の伝送特性は不安定であった。1953年にAbraham van Heel^[4]は実用的な光ファイバ、すなわち光を通すコア(芯)の周りに低屈折率のガラスを衣(クラッド)のように着付けて全反射により特性を安定させた現在の光ファイバ、クラッド付き光ファイバ、を開拓した。そして1954年にHarold H. Hopkins とNarinder S. Kapany(英)らはそれを発展させた^[5]。さらに1961年には導波モードの解析から単一モード光ファイバが認識された。1964年にはCharles KoesterとElias Snitzer(米)は、光ファイバに希土類元素Ndをドープした光ファイバ増幅器の実験を行った。この頃の光ファイバは損失が大きく、光ファイバ束などによる計測応用が主な対象となっていた。

3-3 光通信実験 1961年にIvan P. Kaminow(米)は光学結晶を用いてHe-Neガスレーザー光のマイクロ波変調実験を行った^[6]。同年にはHe-Neガスレーザーを用いた空間伝送の光通信実験が、“Talking Light”と呼ばれてベル研究所(米)で、初めて行われた^[7]。

3-4 光ファイバ通信実験 1963年5月26日の東京工業大学全学祭において、筆者、末松は学生らと、情報を載せたレーザー光を光ファイバで送る「光“ファイバ”通信」実験(日)を、初めて行った^[8]。この実験は、図1のように、NEC製のHe-Neガスレーザーから出たレー

[1] A. Einstein, "Zur Quantentheorie der Strahlung," *Physik Zeitschr*, XVIII, pp. 121-128, 1917.

[2] J. von Neumann, "Notes on the photon-disequilibrium-amplification scheme (JvN), September 16, 1953," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-23, no. 6, pp. 659-673, June 1987.

[3] A.L. Schawlow and C.H. Townes, "Infrared and optical masers," *Phys. Rev.*, vol. 112, no. 6, pp. 1940-1949, Dec. 1958.

[4] A.C.S. van Heel, "Optische afbeelding zonder lenzen von afbeeldingspiegels," *De Ingenieur (Netherlands)*, vol. 65, 25, 1953.

[5] H.H. Hopkins and N.S. Kapany, "A flexible fiberscope, using static acanning," *Nature*, vol. 173, 39, 1954.

[6] I.P. Kaminow, "Microwave modulation of the electro-optic effect in KH₂PO₄," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 6, No. 10, p. 528, May 15, 1961.

[7] W. Sullivan, "'Talking' Light, Bell Shows Beam of 'Talking' Light," *New York Times*, Feb. 1, 1961.

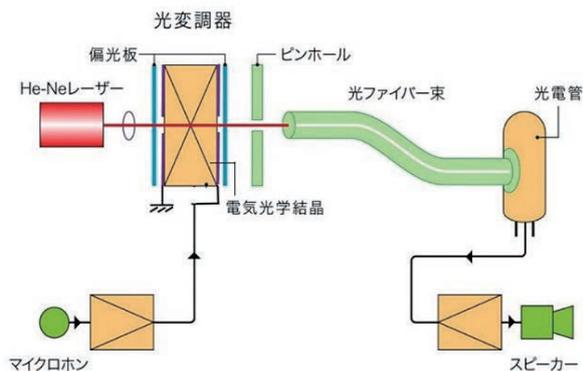


図1 初の光“ファイバ”通信実験、1963-5-26 東京工業大学創立記念日の全校祭で公開^[8]。

ザ光に、自作の光変調器で音声信号を乗せ、光ファイバ束（キヤノン研究所より提供）を通して、光電管（RCAブランドの浜松テレビ製）で受けて音声信号に戻す光ファイバ通信実験であった。光変調器は光学結晶ADP（Ammonium Dihydrogen Phosphate）を用いて試作した偏波方向を変えて偏光板で強度変調に変換する形式で、光に音声を乗せる装置であった。このADP結晶は1957年に理化学研究所で難波進と小川智哉が作製したもので、現在でも東工大の博物館に保存されている。当時用いた光ファイバは多成分ガラス製で、損失は大きく、1m程度の長さで光の強さは数分の一に減少した。

3-5 レンズ導波路と分布屈折率光導波路 1964年にNTTの平野順三と深澤良治は、レンズ列光導波路では光ビームが伝搬につれてレンズから外れてしまう不安定性の不具合を見出した。1965年に、Herwig Kogelnik（米）や筆者と吹抜洋司（日）などはガスレンズ状媒質などの分布屈折率光導波路の伝搬モードを解析的に明らかにした。同年に、東北大の西澤潤一と川上彰二郎（日）は、ガラスの分布屈折率媒質のクラッド層による損失の解析を行い、1968年には分布屈折率光ファイバの伝搬モードの等速性を明らかにした。1969年に日本板硝子とNEC（日）で、二重坩堝法による多成分ガラスの分布屈折率光ファイバが開発された【セルフォックファイバの研究開発、北野一郎・内田禎二、1973 IEICE業績賞】。損失は、当時、20dB/km程度に低下し、1975年にはさらに10dB/km程度に減少したが、その後のシリカ系の低損失化に押された。

3-6 低損失シリカ光ファイバの示唆と製造技術の開拓

1966年にSTCのCharles K. Kao（英）ら^[9]は熔融石英の光散乱実験から、不純物を除去すれば低損失光ファイバ通信の可能性があるとして指摘した【1996 日本国際賞】。1970年にコーニング社のRobert Maurerのグループ（米）はシリカ光ファイバの製造技術を開拓し^[11]、波長0.63μm帯で実用レベルの20dB/kmの低損失化を達成した。この方法はシリカのロッドを石英チューブに差し込んだ母材から紡糸したもので、更なる低損失化には難点があった。

1973年にDonald Keck（米）らは波長1.4～1.8μmくらいの間の長波長帯のどこかで極低損失化されると示唆した^[12]。1974年にJohn B. MacChesney（米）らは、石英チューブの内側に気相成長（CVD）でシリカの煤を堆積してその後に熔融して母材を作るMCVD（Modified Chemical Vapor Deposition）法を開発し、極低損失光ファイバの発展に道筋を付けた^[13]。

3-7 室温連続動作の0.85μm帯半導体レーザー開拓

こうした間に、1966年に筆者は池上徹彦（日）と小型で小電力動作などの利点がある半導体レーザーが数GHz以上の高速で直接変調ができる利点がある事を理論的に見出すと共に^[10]、まだ低温パルス動作しか出来なかった三菱電機のGaAsのホモ接合レーザーを用いて実験的に明らかにした。半導体レーザーの動作理論は1964年にGordon Lasher（米）らがバンドテール理論を発表したが、レーザー動作が扱えなかったので、1970年に筆者は大学人として、西村吉雄（日）らと半導体レーザーの利得やその抑制に関する電子緩和に基づいた基礎理論を開拓した^[21]。

さて、1963年にHerbert Kroemer（米）がヘテロ接合レーザーを提案し、1967年に三菱電機の須崎渉（日）らはAlGaAs/GaAs単一ヘテロ接合結晶を用いて赤色発光を達成した。そして、1969年にIoffe研究所のZhores I. Alferov（ソ）ら、並びに1970年にベル研の林厳雄とMorton B. Panish（米）らは、AlGaAs/GaAs二重ヘテロ接合を用いた0.85μm帯のFP（Fabry-Perot）型半導体レーザーの室温連続（RT-CW; Room Temperature Continuous Wave）動作を独立に達成して実用化への道を開いた【2001 京都賞】、【長寿命半導体レーザーの研究開発の先導、林厳雄・南日康夫（NEC）、

[8] 末松安晴、「最初の光ファイバ通信の実験は東京工業大学の全校祭か～昭和38年（1963）5月26日～」、クローニクル（東工大発行）、pp. 3-4、1986年10月号。
 [9] K.C. Kao and G.A. Hockham, "Dielectric fiber surface waveguide for optical frequency" *Proc. IEEE*, vol. 113, no. 7, p. 1151-1154, 1966.
 [10] T. Ikegami and Y. Suematsu, "Resonance-like characteristics of the direct modulation of a junction laser," *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 1, pp. 122-123, Jan. 1967.
 [11] F.P. Kapron, D.B. Keck and R.D. Maurer, "Radiation losses in glass optical waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 17, no. 7, p. 423, Nov. 15, 1970.
 [12] D.B. Keck, R.D. Maurer, and P.C. Schultz, "On the ultimate lower limit of attenuation in glass optical waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 22, no. 7, pp. 307-309, Apr. 1973.
 [13] J.B. MacChesney, P.B. O'Connor and J.R. Simpson, "A new technique for the preparation of low-loss and graded-index optical fibers", *Proc. IEEE*, Vol. 62, No. 9, pp. 1280-1281, Sept. 1974.

1974 IEICE業績賞}。このAlGaAsレーザに関して、初の横単一モード動作のTJSレーザが開発された {単一モード低しきい値TJSレーザダイオードの研究開発、白幡潔・須崎渉・浪崎博文 (三菱)、1980 IEICE業績賞}。

この頃から企業においても光ファイバ通信への関心が増した。当時の光ファイバの損失はAlGaAs/GaAsレーザの0.85 μ m帯で最低となっていたので、この波長帯の光ファイバ通信の研究が国内外で行われ、NTTでは直接変調による0.85 μ m帯FP型半導体レーザによる通信の諸問題などが検討された {通信用半導体レーザの研究、池上徹彦・伊藤武、1983 IEICE業績賞}。

IV 大容量長距離光ファイバ通信用の半導体レーザの開拓

4-1 1.3 μ m帯半導体レーザ AlGaAs/GaAs系半導体レーザの実用化が進められる一方で、先に述べたようにKeckの予測を先取りして、光通信用の半導体レーザの研究関心も0.85 μ m帯からより長波長帯へと移し、この新しい半導体材料を開拓する必要があった。この長波長帯のレーザ開拓では、R. Moon・G. Antypasら (1974) によると、InP基盤かGaSb基盤の4元混晶による二つの可能性があった。1975年頃に筆者は高い熔融温度や堅さなどからInPを基板にした4元混晶GalnAsP/InP(InP系)のレーザが有力と見なした。こうした未知の材料分野の開拓には、当時の科研費のみでは資金的に対応しきれない恐れがあり、他所に協力を求めたが不首尾の中で、中込雪男KDD研究所長から資金協力が得られ、新しいレーザの研究に専念できた。筆者らが開拓した(100)面InP基盤は現在でも広く用いられている^[21]。MIT Lincoln研究所では1976年、InP系により1.1 μ mの発振を成功させていた。1977年には、NTT、KDDと東工大が、それぞれ1.3 μ m帯のInP系半導体レーザを発振させた^[21]。この1.3 μ mの波長帯では、大容量伝送を妨げる光ファイバの材料分散効果が零になるという特徴があって、最低損失には成らないにしても多モード発振により複数の波長で動作するFPレーザでも用いることができる特徴があった。こうして、企業ではこの1.3 μ m波長帯を用いる光通信の開拓に関心が向かった。

他方、光出力の安定のための横モード制御については、1974年に日立製作所で開発されたAlGaAsレーザの埋込みヘテロ (BH: Buried Hetero) 構造が、その当時はAlの酸化問題でAlGaAs/GaAs系レーザには用いられなかったが、Alを含まないInP系レーザには標準構造として活かされた {埋込みヘテロ構造半導体レーザの発明・開発、塚田俊久・伊藤良一 (日立)、1983 IEICE業績賞}。1.3 μ m帯レーザは、1980年代初頭には、長距

離用に用いられたが、1.5 μ m帯が開拓されてからは、温度特性に優れた特長を活かして短い距離用に用いられている。

4-2 動的単一モードレーザ (波長1.5 μ m帯) 話は前後するが、1975年に筆者、末松安晴はこれから開拓しなければならない本格的な大容量長距離光ファイバ通信として、Keck により1.4-1.8 μ mの間くらいではないかと予想されていた光ファイバ最低損失波長帯において (最終的には図2の様に1.5 μ m帯となった)、単一モード光ファイバと動的単一モードレーザ (Dynamic Single Mode Laser (DSMLレーザ)) と名付けた通信用の半導体レーザ {2014 日本国際賞} からなる、単一モードシステムを提案した^[14](この招待論文は当初、単一モードシステムのみで執筆したが、査読者の要望で多モードファイバを加えさせられて出版が遅れた)。このDSMLレーザは筆者が科学研究費の支援で学生達の協力で開拓した通信用の半導体レーザで、その後の発展をも含めると、次の様な3機能を併せ持つ半導体レーザである: 1) 光ファイバが最低損失となる1.5 μ m長波長帯で動作し、長距離伝送に適應する、2) 安定な単一の波長で動作し、光ファイバ伝搬定数の波長分散による伝送特性の劣化を最小化する、そして3) 波長可変/同調性で、温度的または電氣的に波長同調を行い、通信には必然な複数の波長利用が出来るようにすると共に、ヘテロダインの局部発振器などに適應させる。

このDSMLレーザが実用化された例には、温度同調のDSMLレーザとしての「片端面鏡一様分布帰還 (DFB: Distributed Feed Back) レーザ (一様DFBレーザ)」と「位相シフトDFBレーザ」(図3) とがある。さらに電気同調のDSMLレーザとしての「波長可変レーザ (Wavelength Tunable Laser)」(図4) がある。

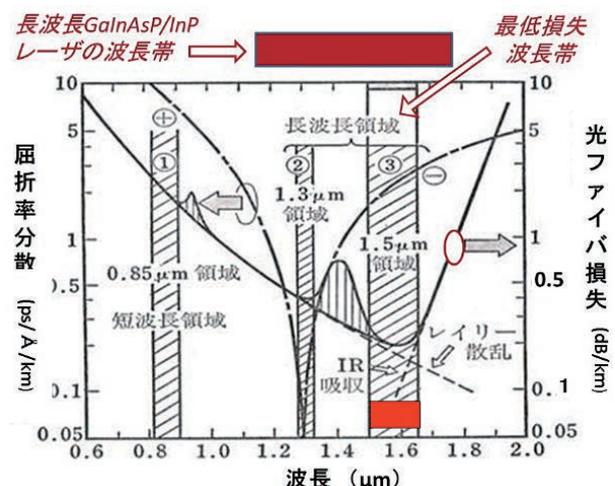


図2 GaInAsP/InP長波長レーザの発振波長範囲とシリカ光ファイバの最低損失波長帯。素データは長波長レーザについては (荒井・末松・板屋)^[18]と光ファイバの損失データ (宮・照沼ら)^[19]による。

[14] Y. Suematsu, "Long-wavelength optical fiber communication," *Proc. IEEE*, vol. 71, no. 6, pp. 692-721, Jun. 1983.

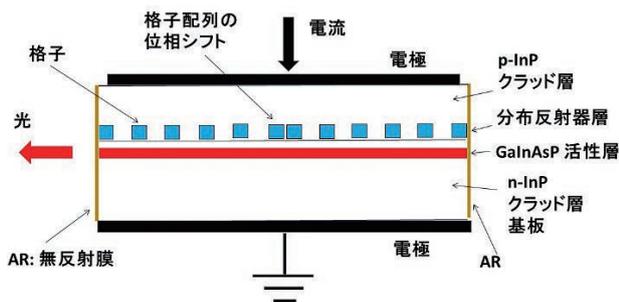


図3 位相シフトDFBレーザ～温度同調のDSMレーザ～、(Sekartedjo・江田・古屋・末松・小山・Tanbun-Ek)^[24]を基に作成。

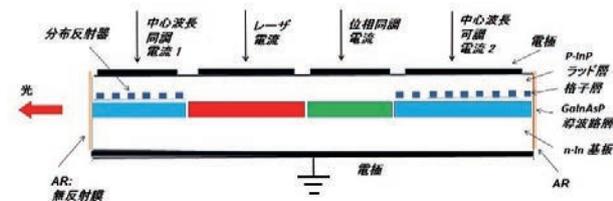


図4 波長可変レーザ～電気同調のDSMレーザ～(末松・宇高)^[25]と(東盛・蔀・末松)^[26]を基に作成。

1972年に筆者は屈折率の低い材料で活性領域を囲む横単一モード動作と^[21]、そして1974年に、2個の分布反射鏡 (DFB/DBR(Distributed Bragg Reflector)) を位相シフトさせて結合させた共振器からなる単一モード共振器を見出して^[15]、DSMレーザを示唆した。DFBレーザを提案したHerwig Kogelnik(米) は、1972年に屈折率差結合の様な分布帰還レーザでは2モード(2波長)で発振するという問題^[16]を指摘したが、上記の単一モード共振器によりこの問題は解決された。その後、単一モード共振器に関しては様々な発展がなされた。1973年に米国で中村道治(日立)とAmnon Yarivらは、0.85 μm 帯で光ポンプによる最初の半導体による一様DFBレーザを試作して波長選択性が強いことを示した^[17]。筆者は、多重共振器による単一モード共振器についても検討を進め、その後のリング共振器レーザなどに発展している。

こうした単一モード共振器や波長可変機構を作り付けた、図4に見られるような半導体レーザや、さらには光

集積回路の実現のために必要不可欠な、レーザ活性層と損失の少ない出力導波路が一体化された集積レーザを、初めて、1974年に実現した {モノリシック光集積回路の基礎研究、末松安晴・山田実・上林利生、1977 IEICE業績賞}。この集積レーザは、後の波長可変レーザなどの新しい機能を持つDSMレーザを生み出す中核技術と成った。

さて、筆者はKeckがシリカ光ファイバの極低損失波長帯と予想した1.4-1.8 μm 帯で働かせるために長波長帯GaInAsP/InPレーザの開拓を進めた^[18]。この間に同時進行で、シリカ光ファイバの最低損失波長帯が1.55 μm 帯にあることがNTTの宮哲雄、照沼幸雄らにより明らかにされた(図2)^[19]。同年の1979年に、筆者は大学院生の荒井滋久や板屋義夫らと、この最低損失波長帯で働く1.5 μm 帯GaInAsP/InP-FPレーザの室温連続動作を達成した^[14]{長波長帯半導体レーザに関する先導的研究、荒井滋久、2010 IEICE業績賞}。これらの長波長レーザの研究は、筆者としては、DSMレーザを達成するための通過点であった。この年には、他に、KDDの秋葉重幸ら、NTTの河口仁司ら、ベル研のKaminowらもこの波長帯で室温連続動作を達成した。

a) 温度同調のDSMレーザ 1980年に、筆者の末松は大学院生の宇高勝之らと、単一モード共振器を一体集積した1.5 μm 帯のDSMレーザを実現し、高速直接変調の下で単一モード動作を達成し^[20]、さらに室温連続動作に成功した^[21]。このレーザは温度同調のDSMレーザであった。安定な横単一モード動作には、先述の埋込みヘテロ接合を用いた。

このDSMレーザの実現が契機と成り、1981年の後半には、KDDの宇高勝之(同社に就職)・秋葉重幸・堺和夫ら^[22]や、NTTの松岡隆志・永井治男・板屋義夫(NTTに就職)らは^[23]、実用的な温度同調のDSMレーザとして、片端面鏡一様DFBレーザを実現した。そして、これが企業に於いて実用化され、大容量長距離光ファイバ通信実験が行なわれるようになった {長距離大容量光通信用半導体デバイスの開発、小林功郎・水戸郁夫・田

[15] 末松安晴、林健二、「分布反射器とこれを用いたレーザ共振回路の一般解析」、昭和49年度電子通信学会全国大会、1200, p. 1203, July 25-27, 1974.(英文表記: Y. Suematsu and K. Hayashi, "General analysis of distributed Bragg reflector and laser resonator using it," in *Nat. Convention of IECE*, 1200, p. 1203, July 1974.)

[16] H. Kogelnik and C.V. Shank, "Coupled wave theory of distributed feedback lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 5, pp. 2327-2335, May 1972.

[17] M. Nakamura, A. Yariv, H.W. Yuen, S. Somekh, and H.L. Garvin, "Optically pumped GaAs surface laser with corrugation feedback," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 22, no. 10, pp. 515-516, May 1973.

[18] S. Arai, Y. Suematsu, and Y. Itaya, "1.11-1.67 μm (100) GaInAsP/InP Injection Lasers Prepared by Liquid Phase Epitaxy," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-16, no. 2, pp. 197-205 (Feb. 1980).

[19] T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka and T. Miyashita, "An ultimately low-loss single-mode fiber at 1.55 μm ," *Electron. Lett.*, 15, 4, pp. 106-108, Feb. 1979.

[20] K. Utaka, K. Kobayashi, and Y. Suematsu, "Lasing characteristics of GaInAsP/InP integrated twin-guide lasers with first-order distributed Bragg reflectors," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, no. 5, pp. 651-658, May 1981.

[21] Y. Suematsu, "Dynamic Single-Mode Lasers," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 6, pp. 1144-1157, March 15, 2014.

[22] K. Utaka, S. Akiba, K. Sakai, and Y. Matsushima, "Room-temperature CW operation of distributed feedback buried-heterostructure InGaAsP/InP lasers emitting at 1.57 μm ," *Electron. Lett.*, vol. 17, no. 25/26, pp. 961-963, Dec. 1981.

[23] 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, Jan. 1982.

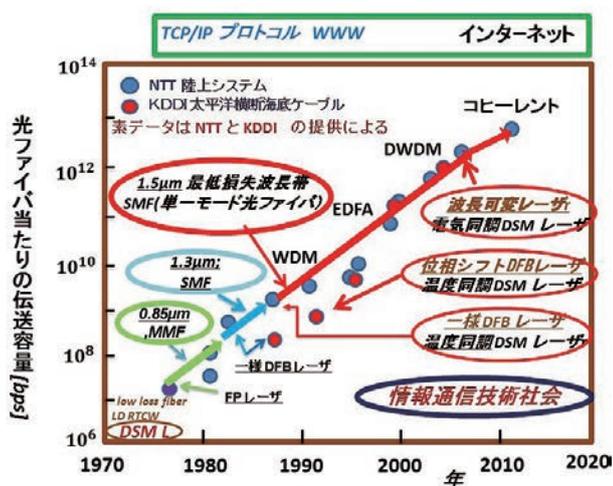


図5 光ファイバ当たりの商用伝送容量の年次増加と、システムそして光源の半導体レーザー。素データはNTTとKDDIのご厚意による。

口剣申 (NEC)、1988 IEICE業績賞}。

さらに、1983年に筆者は東工大の古屋一仁らと単一モード共振器^[15]を実装した、上記の位相シフトDFBレーザー (図3) を実現した^[24]。このレーザーは、製造段階で、電子ビーム露光機によるレジスト露光で単一モード分布反射共振器が作り込まれるので、所定の位相シフト量が製造プロセス時に設定され、指定した単一波長性を保証する製造の歩留まりが高い (三菱電機で実証)。1984年に、このレーザーはKDDの宇高・秋葉らにより実用化された。生産の歩留まりが高いこのレーザーは、AT&TやNTTで開拓された広範囲の波長帯をカバーするレーザー・アレーの個々のレーザーとしても多用されている。1.5μm帯の位相シフトDFBレーザーは、1992年に太平洋横断光海底ケーブル、TPC-4、に用いられて以来、大容量長距離光ファイバ通信の標準レーザーとして陸海で広く用いられている (図5)。

DSMレーザーの単一モード性能は、所望の光出力 (普通は数十mW) を、抑圧された隣接モードの微少な光出力で割った比、すなわちSMSR (Side Mode Suppression Ratio) で表した (普通は約40dB前後) が、後にはこの学術用語がJISやIECの国際的な標準用語となった ([21]参照)。初期のDSMレーザーの開拓と長波長帯の単一モード光ファイバ通信の考えは招待論文にまとめられている (1983)^[14]。

b) 波長可変レーザー；電気同調のDSMレーザーの開拓

電氣的に波長が同調できる電気同調のDSMレーザー、いわゆる波長可変レーザーは1980年に筆者の末松らが提案し^[25]、^[26]、ついで1983年に大学院生の東盛裕らと共に実証した^[21]。この波長可変レーザーはDBR型レーザーで、図4に示すように電子注入によるプラズマ効果やマイクロヒータ (金子ら^[27]) で温度を局所的に変えるなどによって、二つの反射器と位相領域のそれぞれの屈折率を変え、二つの反射器のそれぞれの中心波長や、位相領域の位相量をそれぞれ変化させる。こうして、波長可変レーザーは単一モード共振条件を満足させながら、電氣的に波長を変えられる。

その後、1987年にNECの村田茂らや富士通の金子らで代表される企業人によって、当初に提案した反射器領域と位相領域の屈折率を、それぞれ複数の制御電極で電氣的に変えて波長を制御する、波長可変レーザーが実現された (図4)。さらに1993年にはNTTの東盛裕・吉国裕三ら^[28]やLarry Coldren (米) らが、複数の周期構造を混在させた分布反射器を用いると共に、バーニア効果^[29]と呼ばれる共振の波長を飛び飛びに変える技術を導入して、波長可変範囲を拡大した。

波長可変レーザーには、2個の分布反射器を図4の様に両端に置く代わりに、Y型の導波路を用いて、2個の各々の枝に分布反射器を作り付けた波長可変レーザーも実用化されている。このY型波長可変レーザー^[30]は、1984年から一年半留学していたBjoern Brobergがスエーデンに帰国後立ち上げたベンチャー企業Syntuneで商用化されている。さらに、分布反射器の代わりに2重リング共振器を外部鏡として用いるものもある。

また、前項で述べたアレーレーザーをも波長可変レーザーと呼ぶことがある。

これらの波長可変レーザーは、まず米国で2004年に高密度の波長領域多重 (DWDM; Dense Wavelength Division Multiplexing) 通信用に商用化され、2005年からは国内でも用いられている (図5)。さらに、デジタル・コヒーレント通信の実用化に伴って、狭スペクトルで同調が容易なレーザーとして広く用いられるようになった。

[24] K. Sekartedjo, N. Eda, K. Furuya, Y. Suematsu, F. Koyama, and T. Tanbun-Ek, "1.5μm Phase-Shifted DFB Lasers for Single-Mode Operation," *Electron. Lett.*, vol. 20, no. 2, pp. 80-81, Jan. 1984.

[25] 末松安晴、宇高勝之、昭和56-116683、「同調及び周波数変調機構を具える分布反射型半導体レーザー」、特許公開：昭56/9/12 (1981)、出願番号：昭55-19049、出願：昭和55/2/20b, 1980.

[26] 東盛裕一、蔣霽、末松安晴、「半導体レーザーの波長制御」、電子通信学会研究会資料、OQE84-81, pp.15-22, 1984.(英文表記：Y. Tohmori, X. Jiang, and Y. Suematsu, "Wavelength tuning of semiconductor lasers," *IEICE Jpn., Tech. Group Report*, OQE84-81, pp. 15-22, 1984.)

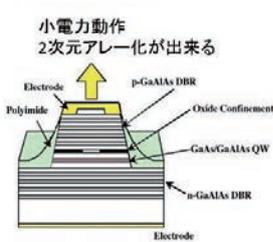
[27] T. Kaneko, Y. Yamauchi, H. Tanaka, T. Machida, T. Ishikawa, T. Fujii, and H. Shoji, "High-power and low phase noise full-band tunable LD for coherent applications," *OFC/NFOEC*, Mar. 24, 2010.

[28] 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. Quant. Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1817-1823, June 1993.

[29] V. Jayaraman, Z.-M. Chuang, and L.A. Coldren, "Theory, design, and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1824-1834, June 1993.

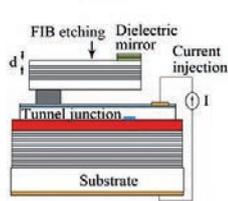
[30] J.O. Wesstroem et al, "State-of-the-art performance of widely tunable modulated grating Y-branch lasers," *Optical Fiber Communication Conference. OFC 2004*, 2004.

VCSELの構造



Proposal K. Iga, 1977
RT-CW Operation, F. Koyama & K. Iga, 1988

温度無依存マイクロ機構付き VCSEL



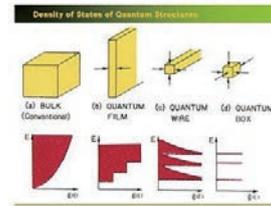
Janto, Hasebe, Nishiyama, Caneau, Sakaguchi, Matsutani, Koyama and Zah, 2006

図6 面発光レーザー：VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) {伊賀 1990 IEICE業績賞}、と温度無依存波長のVCSEL (Janto・長谷部・西山・Caneau・坂口・松谷・小山)^[32]を基に作成。

4-3 面発光レーザー (VCSEL) 東工大では、基板面に垂直に光を出す面発光レーザーが1977年に着想され、1988年に室温連続動作が達成され〔面発光半導体レーザーの先駆的研究、伊賀健一、1990 IEICE業績賞〕(図6)、実用化には小山二三夫らの協力があつた。このレーザーはその後VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) と呼ばれ、小電力動作や二次元アレー化できる特徴があつて、中・近距離光ファイバ通信の有力な光源として、長距離用の大きな光出力のDSMLレーザーを補完し、広く用いられている。VCSELは原理的には短共振器長のDBRレーザーで、中間領域長を適切に位相シフトさせればDSMLレーザーとして働く。短距離では多モード動作で十分なこともあり、また波長も、1.5 μm 帯に比べて温度特性に優れた0.85 μm 帯の短波長帯を中心にして用いられる。

2000年にはConnie J. Chang-Hasnain (米) はMEMSを装着して機械的に波長を可変させるVCSELを開拓した^[31]。2006年には小山らが温度変化では波長が変わらないVCSELを開拓するなど、多彩な発展を続けている。2008年には古河電工の粕川秋彦のグループで高効率のVCSELが開発され、電力効率が62%、光出力10mWが報告されている。なお、2001年のブッシュ大統領による米国のナノテクノロジー技術推進イニシアティブではHEMTと共にVICSELが他山の石として例示された。

4-4 歪み量子井戸・量子ドット構造によるレーザー特性の改善と材料 この間に薄膜作製技術の進歩があつて、超格子構造によってバルク材料よりすぐれた電気・光変換特性を達成する研究が発展した。バルク材料では



Strain Super Lattice :
G.C. Osbourn : 1983
A.R. Adams : 1986

QW: J.P.van der Ziel, et al. 1975
QD: Y.Arakawa and H.Sakaki 1982

Electronic Band Control and Valence Band Control.

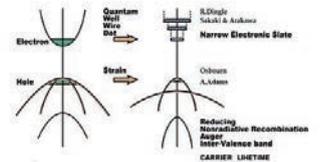


図7 歪み量子井戸構造と量子ドット構造のエネルギー構造、(van der Zielら)^[33]、(Osbourneら)^[34]、(Adamsら)^[36]と{榊・荒川1990 IEICE業績賞}を基に作成。

高信頼動作の要請から材料に歪みを残さないために、ヘテロ構造間の格子整合は約0.03%以内と厳しかった。しかし、膜厚が数十nmの超格子構造ではこの制限がなく、逆に、歪みを加えて材料の性能向上に使われるようになった。1975年にJ.P. van der Ziel(米)らは量子井戸構造を用いるレーザーを発表し(光励起)^[33]、1982年にはGordon C. Osbourn (米)らは歪みを加えた超格子構造^[34]の有用性を提言し(図7)、1986年にEli Yablonovichらはホールの有効質量低減効果^[35]を述べた。またInGaAsP/InPレーザーの開拓の初期に筆者と共に研究を行ったAlfred Adamsらは、帰国後の1986年にSurry大学で歪みによる価電子帯の状態を好転させるBand Structure Engineering^[36]を唱え、PhilipsのPeter J. A. Thijs を促して1.5 μm 帯量子井戸構造レーザーの発振閾値や温度特性などの基本特性を抜本的に改善した^[37](図8)(1991)。国内外でこうした研究が盛んに行われた〔光通信量子井戸構造半導体レーザーの開発、茅根直樹(日立)・Won-Tien Tsang(BTL)・水戸郁夫(NEC)、1995 IEICE業績賞〕。

1982年には東大で量子箱(現在のQuantum Dots (QDs))構造のレーザーが提言され〔量子効果デバイスの先駆的研究、榊裕之・荒川泰彦、1990 IEICE業績賞〕、1993年にはD. Leonardら(佛)が蒸着により表面に粒々に固まったQDsが直接に作製されると明らかにして^[38]、作製条件を広げた。1994年に大学院生の平山秀樹らと筆者はQDs構造のレーザー発振に初めて成功した^[39]。2004年に荒川は大坪らと共に、QDsレーザーの光出力が温度によらない優れた特性を示すことを実証し

[31] C.J. Chang-Hasnain, "Tunable VCSEL," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 6, no. 6, pp. 978-987, Nov./Dec. 2000.

[32] F. Koyama, S. Kinoshita and K. Iga, "Room-temperature cw operation of GaAs vertical cavity surface emitting laser", *Trans. IEICE*, vol. E71, no. 11, pp. 1089-1090, Dec. 1988.

[33] J.P. van der Ziel, R. Dingle, R.C. Miller, W. Wiegman, and W. A. Nordland, Jr., "Laser oscillation from quantum states, in very thin GaAs-A_{0.2}Ga_{0.8}As multilayer structures," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 26, no. 8, pp. 463-465, Apr. 1975.

[34] G.C. Osbourn, "In_xGa_{1-x}As-In_yGa_{1-y}As strained-layer superlattices: A proposal for useful, new electronic materials," *Phys. Rev. B*, vol. 27, pp. 5126-5128, Apr. 1983.

[35] E. Yablonovich and E.O. Kane, "Reduction of threshold current density by the lowering of valence band effective mass," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-4, no. 5, pp. 504-506, May 1986.

[36] A.R. Adams, "Band structure engineering for low-threshold, high-efficiency semiconductor lasers." *Electron. Lett.*, vol. 22, pp. 249-250, 1986.

[37] P.J.A. Thijs, L.F. Tiemeijer, P.I. Kuindersma, J.J.M. Binsma, and T. Van Dongen, "High performance 1.5 μm wavelength InGaAs/InGaAsP strained quantum well lasers and amplifiers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 6, pp. 1426-1439, June 1991.

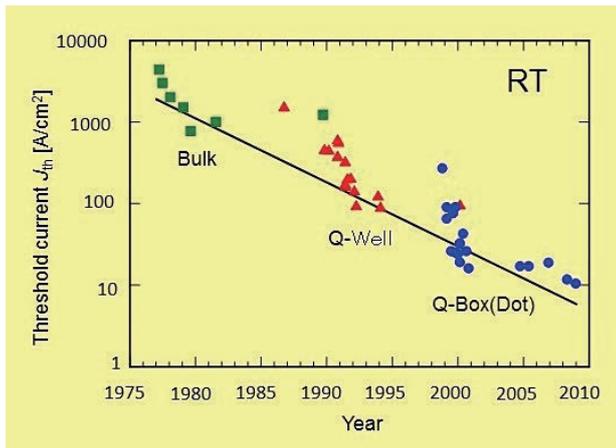


図8 長波長帯半導体レーザーの発振閾値電流密度の年次の改良、波長1.2~1.7 μm (西山信彦による)。

た^[40]。量子井戸や量子ドット構造の活用は伝導帯の電子準位を高密度化し、ひずみ構造は価電子帯の構造を改善した(図7)。こうした超格子構造は、主として、DSMLレーザーなどの活性層に用いられて、温度特性の改善に役立てられている。

また、高温動作を目標にしてクラッド材にエネルギー幅の大きな半導体を用いるレーザーの開拓が行われ、日立ではInGaAlAsが開発された{InGaAlAs材料系を用いた毎秒10ギガビット伝送用高温動作通信用光源、中原宏治・土屋朋信・青木雅博、2006 IEICE業績賞}。

4-5 半導体レーザーの基礎理論 通信用半導体レーザーの発展には、現象の本質を理解し、究極的な性能を引き出すのに、理論的基礎の解明が不可欠であった。初期の動力学的開拓を初め、下記の多くの研究者の優れた貢献があった：Alfred R. Adams (英)、秋葉重幸、Markus G. Amann (独)、浅田雅洋、茅根直樹、Magnus Danielson (丁抹)、Herman A. Haus (米)、Charles Henry (米)、Gordon D. Henshall (英)、伊藤良一、神谷武志、小林功郎、Thomas L. Koch(豪)、小山二三夫、Gordon Lasher (米)、Kam Y. Lau (米)、大津元一、水戸郁夫、西村吉雄、覧具博義、Kristian Stubkjaer (丁抹)、魚

見和久、山田実、Eli Yablonovich (米)、そしてAmnon Yariv (米) など。ここでその詳細を述べる紙面は許されないなので、総合論文を参照されたい^[21]。

以下に一、二の例を述べたい。半導体レーザーに不安定性をもたらす非線形現象^[8]は、レーザー共振器の横幅をキャリアの拡散長、すなわち2 μm 程度、とすることで実質抑制される(1978)。また、自然放出と誘導放出とを結びつける自然放出光係数(1977)により半導体レーザーのスペクトル線幅が表わされ、これが共振器長の二乗に反比例することから、共振器長を長くすることで狭スペクトル化が達成されている。さらにレーザー効率を妨げる非発光遷移の解明や共振器内の注入キャリアの流失などの現象も明らかにされ、新たな材料開拓に活かされている(1980)。

4-6 半導体光増幅器 半導体による光増幅器(SOA; Semiconductor Optical Amplifier)は将来性のあるデバイスであり、すでに1966年にはCroweらがその利用を提唱し^[41]、1978年に東工大の岸野・末松・宇高らにより半導体レーザーと半導体レーザー増幅器が一体集積され^[42]、1981年には上林・末松によりバルク型の雑音特性が^[43]、1985年にはNTTの向井・山本・木村が半導体レーザー増幅について述べ^[44]、1991年に小森・荒井・末松らにより量子箱型(QD)による雑音指数向上が提唱された^[45]。実用面では偏波を考えなくても良いPICs(光集積回路)^[66]の内部や出力端でブースター増幅にSOAが広く用いられている。他方では、光回線に用いるために、1991年には偏波依存性の少ない伸張ひずみを加えたMQWを用いるSOAがNTTの曲・岡本・野口により試みられ^[46]、田口・浅香・藤原らにより、光アクセスの次世代規格(NG-PON2)候補、TDM/WDM-PON応用のフィールドトライアルの結果が報告されている^[47]。

[38] D. Leonard, M. Krishnamurthy, C.M. Reaves, S.P. Denbaars, and P.M. Petroff, "Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surfaces," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, no. 23, pp. 3203-3205, Dec. 1993.
 [39] H. Hirayama, K. Matsunaga, M. Asada, and Y. Suematsu, "Lasing action of Ga_{0.67}In_{0.33}As/GalnAsP/InP tensile-strained quantum-box laser," *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 2, pp. 142-143, Jan. 1994.
 [40] K. Otsubo, N. Hatorim, M. Ishida, S. Okumura, T. Akiyama, Y. Nakata, H. Ebe, M. Sugawara, and Y. Arakawa, "Temperature-insensitive eye-opening under 10-Gb/s modulation of 1.3- μm P-doped quantum-dot lasers without current adjustments," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 8B, pp. L1124-1126, July 2004.
 [41] J.W. Crowe and W.E. Ahearn, "Semiconductor laser amplifier," *IEEE J. QE-2*, pp. 283-289, Aug. 1966.
 [42] K. Kishino, Y. Suematsu, K. Utaka, and H. Kawanishi, "Monolithic Integration of Laser and Amplifier/Detector by Twin-Guide Structure," *Japan. J. Appl. Phys.*, vol. 17, no. 3, pp. 589-590, Mar. 1978.
 [43] T. Kambayashi and Y. Suematsu, "Amplification characteristics of integrated twin-guide laser amplifier," *Trans. IEICE Japan*, vol. E64, no. 7, pp. 489-496, July 1981.
 [44] T. Mukai, Y. Yamamoto, and T. Kimura, "Optical amplification by semiconductor laser," *Semiconductor and Semimetals, Academic*, vol. 22-E, pp. 265-319, 1985.
 [45] K. Komori, S. Arai, and Y. Suematsu, "Noise in Semiconductor Laser Amplifiers with Quantum Box Structure," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 39-41, Jan. 1991.
 [46] K. Magari, M. Okamoto, and Y. Noguchi, "1.55 μm polarization-insensitive high-gain tensile-strained-barrier MQW optical amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 11, pp. 998-1000 (1991).
 [47] K. Taguchi, K. Asaka, M. Fujiwara, S. Kaneko, T. Yoshida, Y. Fujita, H. Iwamura, M. Kashima, S. Furusawa, M. Sarashina, H. Tamai, A. Suzuki, T. Mukojima, S. Kimura, K.-I. Suzuki, and A. Otaka, "First field trial of 40-km reach and 1024-split symmetric-rate 40-Gbit/s λ -tunable WDM/TDM-PON," *OFC '2015*, Th5A. 6, Los Angeles, USA, March, 2015.

V 極低損失光ファイバの開拓

5-1 極低損失シリカ光ファイバの製造技術

すでに述べたように、半導体レーザーが室温連続動作を達成された1970年、奇しくも同年に、前述の様にF.P. Kapronら(米)は低損失シリカ光ファイバの製造技術を開拓し、波長0.63 μm 帯で実用レベルの20dB/kmを達成した^[11]。しかし、この製造技術は更なる低損失化には難点があった。1974年にJohn B. MacChesney(米)らは、石英チューブ内側に気相成長(CVD)でシリカの煤を堆積してその後ろに熔融して母材を作る、MCVD法を開発した^[13]。

1976年には、この技術に基づいてNTTと藤倉では1.3 μm 帯で低レベルOHの光ファイバを作成して極低損失、0.47dB/km、を初めて達成した{極低損失長波長帯光ファイバの研究、堀口正治(NTT)・小山内裕(藤倉)、1976 IEICE業績賞}。さらに1979年に、NTTの宮、照沼らは光ファイバの最低損失波長帯が1.55 μm にあることを明らかにし(図2)^[19]、1986年には住友電工の金森弘雄らが、その最低損失波長帯で0.154dB/kmの極低損失を達成した^[48]。ガラスファイバの損失は図9に示すように1970年代に劇的に減少した。

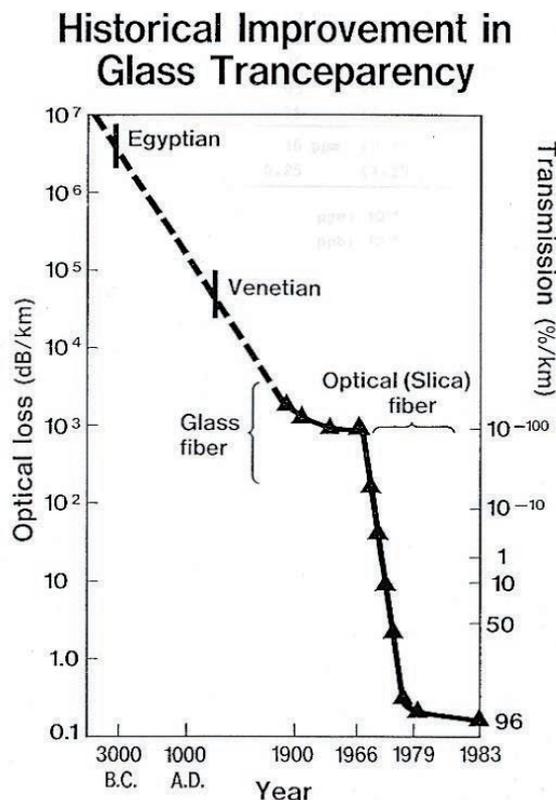


図9 ガラス光ファイバ損失の年次改善(村田浩による)。

5-2 VAD法の連続製造技術 NTTはガラス中の微量OH基濃度の分布測定技術を開発して、極低損失シリカ光ファイバ製造技術の開発を進めた。惨憺たる苦勞の末に、1977年にNTTでは日本の電線メーカーと、図10に示すように、シリカを煤として軸方向に堆積し、その後ろに熔融して母材を作る光ファイバ製造技術VAD(Vapor-phase Axial Deposition)法が開発された{光ファイバ連続製造法(VAD)の研究開発、伊澤達夫・枝廣隆夫・中原基博(NTT)、1980 IEICE業績賞}。現在、世界のシリカ光ファイバの多くが、このVAD法による光ファイバの連続製造技術で製造されている。

5-3 分散シフト光ファイバ 単一モード光ファイバの伝送特性を阻害する要因の一つは、前述の様に、伝搬モードの伝搬定数が波長によって異なる群速度の分散である。1975年にDavid N. PayneとWilliam A. Gambling(英)は、シリカ光ファイバの材料分散が零になる零分散波長は波長1.3 μm であると明らかにした。

同年に、東北大で、W型屈折率分布の単一モード光ファイバにより零分散波長がシフトされ、分散特性が制御出来ることが明らかにされた{光ファイバの高性能化に関する先駆的研究、川上彰二郎、1987 IEICE業績賞}。さらに、例えば1994年に大西正志(住友)らは、長距離伝送用に広い波長帯に亘って分散の少ない高性能な分散補償光ファイバを実現し、単一モード光ファイバの性能を向上させた。ただ、後述の非線形現象により波長の異なるチャンネル間で混信が起るので、伝送方式によっては広い範囲で分散を零にするととは限らない。

5-4 光ファイバ増幅器 光通信の主力波長帯、1.5 μm 帯に於いて、光ファイバ増幅器が広く用いられて、長距離光通信の低コスト化に貢献している。

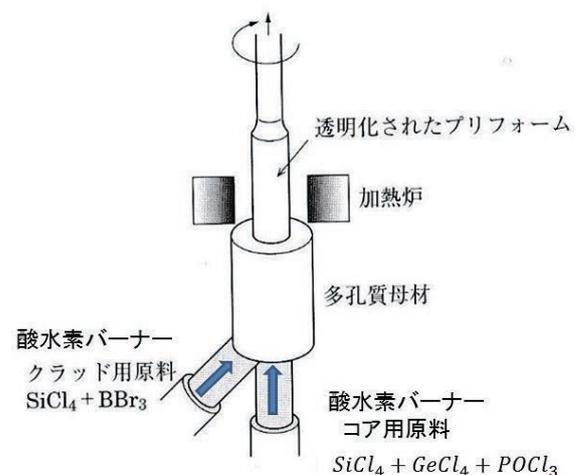


図10 光ファイバの連続製造方法：VAD(Vapor-phase axial deposition)、{伊澤・枝廣・中原 1980 IEICE業績賞}を基に作成。

[48] H. Kanamori, H. Yokota, G. Tanaka, M. Watanabe, Y. Ishiguro, I. Yoshida, T. Kakii, S. Itou, Y. Asano, S. Tanaka, "Transmission Characteristics and reliability of pure silica core single mode fibers," *J. Lightwave Technol.*, Vol. LT-4, No. 8, August, 1986.

(a) 光ファイバ・レーザ 1984年に、NTTの中沢・徳田らは、Er³⁺(Erbium) ドープの光ファイバ・レーザを開拓し、光ファイバのOTDR(Optical Time Domain Reflectometry) に用いている。各種の光ファイバ・レーザが開拓されており、1.5μm帯ソリトン通信の光源や、大容量通信の光源などに用いられている。

(b) 1.5μm帯光ファイバ・ラマン増幅器 1.4-1.5μm帯の偏波保存光ファイバを用いて、1985年に、NTTの中澤・中島・青海らにより、光励起によるラマン効果の原理を用いた光増幅器が開発された^[49]。この様な光増幅器の導入で、光ファイバ伝送路を総体として損失が補償された活性伝送路 (Active Transmission line) として扱うことが出来、実用が進んでいる。

(c) Er³⁺ドープの光ファイバ増幅器 1.5μm帯において、1987年にDavid N. PayneのグループのRobert J. Mears (英) らは28dBの増幅度をもつ希土類元素のErを光ファイバにドープしたEr³⁺ドープ光ファイバ増幅器 (EDFA; Erbium Doped Fiber Amplifier) を実現した (図11)^[50]。1989年にNTTで、半導体レーザで光励起したEDFAにより低損失の長波長帯を40nmと広くカバーするコンパクトな光増幅器が開拓され、EDFAの実用化を促進した {エルビウム光ファイバ増幅器とその応用に関する先駆的研究、中沢正隆・萩本和男、1993 IEICE業績賞}。

EDFAが開発されて各中継り所で電気信号に落とすことなく、光を一括増幅出来るので、長距離光システムが低コスト化した。Er以外の材料を用いる光増幅器も開拓されている。

5-5 光励起用半導体レーザ 1.5μm帯のEDFA用の光励起光源には1W近くの大出力が要求され、Donald B. Scifres(米) らが1991年に波長980nmの光励起用レーザを開発した。Atul Mathur (米) らは2000年に励起

波長1.4μm半導体レーザで、出力1Wの単一モード共振器レーザを開発した。2003年にはNECで、波長1.4μmで出力パターンが単峰な、出力結合効率が84%に達する低消費電力型の多モード共振器レーザが開発された。また古河電工では高出力の励起用レーザモジュールが開拓されている {光ファイバアンプ励起用高出力レーザモジュール、粕川秋彦・伊地知哲朗・池上嘉一、2000 IEICE業績賞}。

5-6 光ファイバの接続技術・偏波制御・低曲げ損失化 1978年にNTTの畠山巖と土屋治彦らは低損失の熔融接続法を開発し、その後の発展により単一モード光ファイバの利用拡大に弾みを付けた {光ファイバ接続技術の開発、杉田悦治 (白山)・佐武俊明 (US Conec)・加島宜雄 (芝浦工大)、2010 IEICE業績賞}。

通常の光ファイバでは、伝えられる光の偏波面は伝搬につれて変化する。ヘテロダイン通信方式などのように偏波面を一定の方向に保つために偏波保存光ファイバが用いられている {偏波面保存光ファイバの開発、大越孝敬 (東大)・佐々木豊 (NTT)・松村宏善 (日立)、1982 IEICE業績賞}。

1996年にJonathan C. Knight (英) はフォトニック結晶光ファイバを開拓した。2004年にNTTでは、ほぼ直角に曲げられる光ファイバとして、コアを複数の空孔で取り囲んだ光ファイバが開拓されて、屋内配線に役立てられ、FTTHの普及に貢献をした {低曲げ損失光ファイバの実用化、中島和秀・三川泉・富田茂 (NTT)、2012 IEICE業績賞}。

5-7 光入力電力制限 光ファイバは小さなコアに光を閉じ込めるので、一定以上の光電力を入れると損傷が生じ、利用出来る入力光電力の大きさが制限され、伝送距離が制限される。さらに、4次の非線形性によるチャンネル間の混信がもう一つの光電力制限要因となっている^[51]。

1984年に、光ファイバのコアに水素が発生して損失が経年的に増大することが報告されて、光ファイバの信頼性に暗雲が垂れ込めようとした^[52]。幸いなことに、この光ファイバ通信の開拓史上での危機は、水素の発生を妨げる光ケーブル材料の開拓等で切り抜けられた。

5-8 光ソリトン伝送 光ファイバの非線形性を用いたソリトン伝送がベル研の長谷川晃により1973年に提案され、実証的な研究や実用化が計られている {光ソリトン伝送技術に関する先駆的研究、中沢正隆 (NTT)・長谷川晃 (阪大)・藤井陽一 (東大)、1995 IEICE業績賞}。

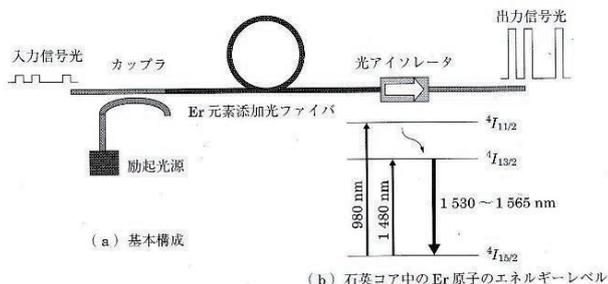


図11 Er³⁺ドープの光ファイバ増幅器、「フォトニクス」オーム社 (2007) より。(Mears・Reekie・Jauncey・Payne)^[50]や {中沢・萩本、1993 IEICE業績賞} を基に作成。

[49] M. Nakazawa, T. Nakashima, and S. Seikai, "Raman amplification in 1.4-1.5 μm spectral region in polarization-preserving optical fibers," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. B-2, pp. 515-521, 1985.
 [50] J. Mears, L. Reekie, I.M. Jauncey and D.N. Payne, "Low-Noise Erbium-Doped Fiber Amplifier Operating at 1.54 μm," *Electron. Lett.*, vol. 23, no. 19, pp. 1026-1028, Sept. 10, 1987.
 [51] R.H. Stolen, "Nonlinearity in fiber transmission," *Proc. IEEE*, Vol. 68, No. 10, pp. 1232-1236, Oct. 1981.
 [52] J.D. Rush, K.J. Beales, D.M. Cooper and W.J. Duncan, "Influence of hydrogen on optical fibres - implications and potential solutions," *ECOC '84*, pp. 108-109, Sept. 1984.

5-9 光ファイバの設計理論と光伝送路理論 光ファイバを安定に用いるために、1980年には中原恒雄らにより光ケーブルの設計と計測が進展し^[53]、それ以前の1977年には古屋一仁と筆者による光ファイバの不規則曲がりによるケーブル化損失の解析が行われ、単一モード光ファイバのコア径設定の指針となり^[54]、さらに、光ファイバのケーブル化技術が発達した〔光ファイバケーブル設計理論と評価方法の研究、内田直也・徳田正満・青海恵之（NTT）、1985 IEICE業績賞〕、〔高密度光ファイバケーブル並びに関連技術の実用化、高島征二・川瀬正明・上野谷拓也（NTT）、1992 IEICE業績賞〕。

初期には、誘電体による光伝送の基礎研究〔ミリ波、光波、弾性波の導波伝送とその応用に関する研究、熊谷信昭（阪大）、1984 IEICE業績賞〕や、田中常雄（1976）らにより多モード光ファイバの厳密解析手法が開拓され、また多モード光ファイバ設計の研究〔光ファイバ内屈折率分布の最適設計と測定法の研究、大越孝敬・岡本勝就・保立和夫（東大）1978 IEICE業績賞〕、そして、高精度解析法〔光・電磁波工学における高精度数値解析法に関する先駆的貢献、小柴正則、2003 IEICE業績賞〕などが、精力的に行われた。

VI 光デバイス・光回路・光集積回路（PICs）の発展

6-1 光検出器 光検出器は原理的には太陽電池と同じ半導体のpn接合であるが、変換効率を上げるために受光領域を厚くし、応答速度を上げるために受光面積を小さくして並列キャパシタンスを低減するなどの工夫がなされている。1953年に、西沢潤一らはPINダイオードとアバランシェダイオード（APD：Avalanche Photo Diode）を特許出願した^[55]。1966年に、L.K. Anderson（米）はSiの高速光検出器、PD（Photo Diode）、について述べ^[56]、R.J. McIntyre（米）はアバランシェ効果で受光電流を増倍するAPDの雑音問題を明らかにし、光吸収で発生する電子かホールのかどちらかのキャリアを強調して雑音を下げる必要があることを見

い出している^[57]。1978年にNTTの神戸宏らは1.1-1.6 μm 帯用のGe-APDを開発した^[58]。1980年にはFederico Capasso（米）らは1.3-1.6 μm 帯用のInGaAsP/InGaAsヘテロ接合p-i-n検出器を開発した^[59]。この長波長帯用PDでは専らInGaAsが用いられている。1997年にNTTの石橋忠夫らは、電子のみを走らせる単一走行キャリア・フォトダイオード（UTC-PD）の高速光検出器を開発した^[60]。

PDの高速化には受光領域を薄くする必要があるが、そうすると受光効率が悪くなる。こうした平面型PDの欠点を補うために、2000年にNECの竹内剛らは導波路を用いて高速導波路型PDを開発した。2001年にKinsey（米）らは導波路型の1.55 μm 帯APDで、利得・帯域巾積が320GHzの極めて優れた広帯域性を達成した^[61]。

6-2 光変調器 すでに述べた様に、1961年にKaminow（米）は光学結晶KDP（ KH_2PO_4 ）を用いて、光のマイクロ波変調を行った^[6]。その後様々な光学結晶が開発され、また、1969年に阪大では導波路型の変調器の低電圧・高速動作の検討が行なわれた〔光変調器の高速化と集積化に関する研究、末田正・井筒雅之1988 IEICE業績賞〕。1987年にはNECの小松耕哉らにより光学結晶LiNbO₃（LN）の表面にTi/Mgをドープして導波路を形成した導波路型の高速度位相変調器が開発されている^[62]。1994年に野口らは広帯域変調器を開発した。また、1986年にKDDの野田らはGaInAsP平面導波路による高速吸収変調器を開発した。東大ではこうした分野の基礎が展開された〔半導体光変調器・光スイッチの基礎的研究 多田邦雄1998 IEICE業績賞〕。また富士通では位相変調用のLN変調器の研究が進められた〔大容量光伝送を実現するための多値位相変調用LN光変調器の先駆的研究、田中一弘・土居正治・杉山昌樹2000 IEICE業績賞〕。

6-3 分波器・合波器 多波長の光波を一つに集めて光ファイバに導く合波器や、逆に、光ファイバで送られて来る多波長の光を各々の波長に応じて選り分ける分波器は、光システムで多用されている。1996年にNTTでは

[53] T. Nakahara and N. Uchida, "Optical cable design and characterization in Japan," *Proc. IEEE*, vol. 68, no. 10, pp. 1220-1226, Oct. 1980.

[54] K. Furuya and Y. Suematsu, "Random Bend Losses in Single-Mode Optical-Fiber Cables: Power-Spectrum Estimation from Spectral Losses," *Electron. Lett.*, vol. 4, no. 19, pp. 653-654, Sep. 1978.

[55] 西沢潤一、渡邊寧、高抵抗博領域を有する半導体光電変換器、特許公報、昭30-8969、出願30/6/1953.

[56] L.K. Anderson and B.J. McMurtry, "High-speed photodetectors," *Proc. IEEE*, Vol. 54, No. 10, p. 1355, Oct. 1966.

[57] R.J. McIntyre, "Multiplication noise in uniform avalanche diodes," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-13, no. 1, p. 164, Jan. 1966.

[58] H. Kanbe, H. T. Kimura, T. Yamaoka, T. Kaneda, "Characteristics of germanium avalanche photodiodes in the wavelength region of 1-1.6 μm ," *Quantum Electronics, IEEE J.* vol. 14, no. 11, pp. 804-809, 1978.

[59] F. Capasso, R.A. Logan, A. Hutchinson and D.D. Manchon, "InGaAsP/InGaAs heterojunction p-i-n detectors with low dark current and small capacitance for 1.3-1.6 μm fiber optic systems," *Electron. Lett.*, vol. 16, no. 23, pp. 893-895, Nov. 1980.

[60] T. Ishibashi, S. Kodama, N. Shimizu, and T. Furuta, "High-speed response of uni-traveling-carrier photodiodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 36, no. 10, pp. 6263-6268, Oct. 1997.

[61] G.S. Kinsey, et al., "Waveguide Avalanche Photodiode Operating at 1.55 μm with a Gain-Bandwidth Product of 320 GHz," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 13, pp. 842-844, Aug. 2001.

[62] K. Komatsu, S. Yamazaki, M. Kondo, and Y. Ohta, "Low-loss broad-band LiNbO₃ guidedwave phase modulators using titanium/magnesium double diffusion method," *J. Lightwave Tech.*, vol. LT-5, pp. 1239-1245, Sept. 1987.

WDM通信用にPLC (Planar Lightwave Circuit) と呼ばれるガラス平面光回路を用いた合波・分波器が開拓され {光通信用平面光波回路の先駆的研究、河内正夫・岡本勝就・大森保治 1997 IEICE業績賞)、さらに高精度のアレー導波路回折格子フィルタが開発されている {WDM伝送用アレー導波路回折格子波長フィルタの先駆的研究、高橋浩・井上靖之・鈴木扇太 2012 IEICE功績賞}。

6-4 光アイソレータ 光は反射して戻るとレーザや光増幅器で増幅されて不安定となる。これを断ち切るのが一方向にしか光を通さない光アイソレータで、極めて重要な機能である。1981年にはNECの青山、土井、内田らはGd: YIGを用いた光アイソレータを開拓している^[63]。

6-5 光集積回路 1960年のレーザの出現と共に光通信の研究が始まったが、マイクロ波の研究者には、レーザや光回路を一体化する光導波路を用いた光集積回路の考えが芽生えていた。光集積回路は光デバイスを高性能化するのみならず量産化によって光デバイスの低コスト化に役立つ。1963年に筆者らは平面レーザの伝搬状態の解析を、Yarivら (米) はpn接合の導波モードの解析を行った。1964年にはD.F. Nelson (米) らはpn接合による光変調を行い、1966年にD.B. Anderson (米) らはリソグラフィによる光回路形成を試み、1968年にはオハイオ州立大 (米) で筆者は導波路型の半導体光パラメトリック発振器を提案した。1969年にStewart E. Miller (米) は自社技術誌BSTJ (Bell System Technical Journal) で光集積回路を具体的に提唱した^[64]。1973年に中村らが光ポンプで動作させた0.85 μ m帯のGaAlAs DFBレーザ^[17]は、1975年に室温連続発振に達した。

1974年に筆者らは集積二重導波路ITG集積レーザ [前出] を、そして1981年にBJB集積レーザを開拓した^[21]。1975年になるとJames L. Merzがテーパ結合集積レーザ、Frans K. ReinhartらがDBR集積レーザ、Charles E. HurwitzらやJ.A. Rossiらがそれぞれ異なる集積レーザを開拓した。日立の相木国男らが1976年に0.85 μ m帯のDFBレーザによる周波数多重光源を開拓した^[65]。

集積レーザは、波長可変レーザのようにレーザ自体の

性能向上に役立てられると共に、能動光集積回路のコア技術として発展した。1977年に筆者は集積レーザを中心とした能動光集積回路を提案、1978年には岸野克己らと半導体レーザと半導体光増幅器 (現在はSOA: Semiconductor Optical Amplifierと呼ばれている) や光検出器との一体集積を達成し、1987年にはこの様なレーザ中心の平面型の光集積回路はPICs (Photonic Integrated Circuits) と呼ばれるようになった^[66]。能動光集積回路はInP基板を用いるのでInP-PICsと云われることもある。レーザと他の光回路との結合のためにNTTの板屋らは1997年にスポットサイズ変換器付きレーザを開拓した^[67]。また、1987年にNTTの川村・脇田らにより吸収型のMQW光変調器を一体集積したDFBレーザが開拓された^[68]。1980年にRobert F. Leheny (米) らは能動/受動一体集積の受光器を開拓した^[69]。2010年に、NTTの瀬川徹と松尾慎治らは二重リング共振器波長同調レーザを一体集積した大規模の波長ルーティングスイッチを開拓し (図12)^[70]、L.A. ColdrenとDaniel J. Blumenthal (米) らは、ルーティングに大量なPICsを開拓した^[71]。2011年のRadha Nagarajan (米) らは超高速Tb/sのコヒーレント受光PICsを開拓した^[72]。大規模集積化は一層進み、2014年には、Summers (米) らは40X57Gb/s (2.25Tb/s) のコヒーレント送信PICsを開拓した。光集積回路では光強度の増大のために、発振前の半導体レーザによる光増幅器 (SOA)

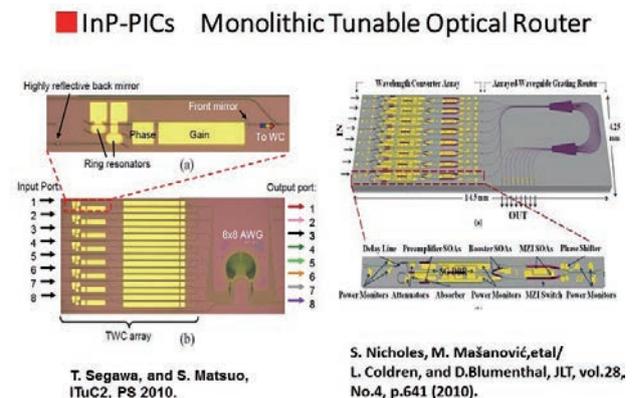


図12 InP基盤の光ルーティングの集積回路、(InP-PICs) (瀬川・松尾)^[70]、(Coldren・Blumenthalら)^[71]。

[63] T. Aoyama, K. Doi, H. Uchida, T. Hibiya, K. Matsumi and Y. Ohta, "A low cost compact optical isolator using a thick Gd: YIG film growing liquid phase epitaxy", *7th ECOC*, Section 8-2, Copenhagen, Sept. 1981.

[64] S.E. Miller, "Integrated optics: An introduction," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 48, no. 7, p. 2059, Sept. 1969.

[65] K. Aiki, M. Nakamura and J. Umeda, "Frequency multiplexing light source with monolithically integrated distributed feedback diode lasers," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 29, No. 8, pp. 506-508, Oct. 1976. Built-in Distributed Bragg Reflector", *Electron. Lett.*, vol. 19, no. 17, pp. 656-657, Aug. 1983.

[66] Y. Suematsu and S. Arai, "Integrated Optics Approach for Advanced Semiconductor Lasers," *Proc. IEEE*, Vol. 75, No. 11, pp. 1477-1487 (Nov. 1987).

[67] Y. Itaya, Y. Tohmori, M. Wada, and H. Hukao, "Spot-size converters integrated laser diodes," *OECC '97*.

[68] Y. Kawamura, E. Wakita, Y. Yoshikuni, Y. Itaya, and H. Asahi, "Monolithic integration of a DFB laser and MQW optical modulator in the 1.5 μ m wavelength range," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-23, no. 6, pp. 915-918, June 1987.

[69] R.F. Leheny, R.E. Nahory, M.A. Pollack and E.D. Beebe, "In_{0.53}Ga_{0.47}As PIN-FET photo-receiver for 1.0-1.7 μ m wavelength fiber optic systems", *Tech. Dig. Integrated and Guided Wave Optics Meet. (Incline Village, NV)*, Paper WC4, Jan. 1980.

[70] T. Segawa, and S. Matsuo, *ITuC2*, PS 2010.

[71] S.C. Nicholes, M.L. Mašanović, B. Jevremović, E. Lively, L.A. Coldren, and D.J. Blumenthal, "640 Gbps 8 × 8 InP monolithic tunable optical router," *Communication*, Aug. 2009.

が随所で用いられている。こうした状況の下で、PICs 開拓にはまだ幾つかの問題がある。その一つは、集積型の光アイソレータである。2000年に東工大で導波路型アイソレータが実現し【光非相回路の先導的研究 水本哲弥 2011 IEICE業績賞】、2005年には東大の中野義昭らは能動型の損失非対称光アイソレータを試作した。

1990年にSi基板上に構成されたシリカ光受動回路のSiO₂/Si集積光回路がNTTの河内正夫により提案され、Si-PICsに発展している。1998年に横浜国大のBrent E. Littleと國分泰雄らは極めてコンパクトなSi/SiO₂マイクロリング共振器を開拓した。

Si-PICsでは光を出すレーザが無く、その欠陥を埋めるためにSi基板やSiやSiO₂導波路にレーザやInP材料を貼り付けるInP-Si-Hybrid-PICs開拓の試みがなされている。2007年にJohn E. Bowers (米) らはインターコネクトを目ざしてSi導波路上に、短波長帯のAlGaInAsレーザウエーハを貼り付けるAlGaInAs-Siの研究を行い、2012年に荒井滋久らはGaInAsPレーザウエーハを貼り付ける研究を行った。2014年にNTTの松尾慎治らは薄いInP薄膜をSi基板に貼り付けて、その上にレーザを作製する研究を行い^[73]、2013年に上智大の下村和彦らは厚いInP膜をSiに貼り付けるなど、InP-Si Hybrid PICsの研究が活発に行われている。さらに、2014年にBowers(米) らはSi基板上に直接に1.3μm帯のQ-Dot

レーザを作製した温度特性の良いレーザを開拓している。InP-Si-Hybrid-PICsの発展が期待されている。

1979年には、I. UryとYariv (米) らはレーザとFETが一体集積された光送信集積回路を開拓し^[74]、1980年にR.F. LehenyとR.E. Nahory(米) らはInGaAs-PIN光検出器とFETの一体集積を行った^[69]。1985年に富士通の和田修らは受光素子と前置電子増幅器の一体集積回路を開発し^[75]、光デバイスと電子デバイスの一体集積回路はOEIC(Opto-Electronic Integrated Circuits) と呼ばれている。

a) フォトニック結晶と光集積回路 1979年に東大で大高一雄(現千葉大)はフォトニック結晶を示唆し^[76]、1987年にEli Yablonovitch(米) によりフォトニック結晶に於いて光デバイスの自然放出禁止帯があると指摘されて、フォトニック結晶への関心が高まった^[77]。2012年にはNTTの松尾らは極低しきい値電流で動作するフォトニック結晶レーザの室温連続発振に初めて成功した^[78]。Michal Bajcsy (米) (2003) などにより超低速光伝搬と光保存の研究も行われている。

b) 積層光集積回路 1981年に東工大の伊賀健一は、2次元アレーレンズと面発光レーザなどの積層集積光回路を提案した。これらはNECの内田禎二が提案したマイクロオプティックスの基礎ともなっている。

(後編は次号に掲載します。)

[72] R. Nagarajan, M. Kato, J. Pleumeekers, P. Evans, S. Corzine, S. Hurtt, A. Dentai, S. Murthy, M. Missey, R. Muthiah, R.A. Salvatore, C. Joyner, R. Schneider, Jr., M. Ziari, F. Kish, and D. Welch, "InP Photonic Integrated Circuits," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 16, no. 5, pp. 1113-1125, Sept./Oct. 2010.

[73] S. Matsuo, T. Fujii, K. Hasebe, et al, *ECOC 40 Anniv. Mo4 3 3*, 2014

[74] I. Ury, S. Margalit, M. Yust and A. Yariv, "Monolithic integration of an injection laser and a metal semiconductor field effect transistor", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 34, no. 7, pp. 430-431, Apr. 1979.

[75] O. Wada, H. Hamaguchi, S. Miura, M. Makiuchi, K. Nakai, H. Horimatsu, and T. Sakurai, "AlGaAs/GaAs p-i-n photodiode/preamplifier monolithic photoreceiver integrated on a semi-insulating GaAs substrate," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 46, no. 10, pp. 981-983, May 1985.

[76] K. Ohtaka, "Energy band of photons and low-energy photon diffraction," *Phys. Rev. B*, vol. 19, pp. 5057-5067, May 1979.

[77] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, pp. 2059-2062, May 1987.

[78] 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, Jan. 1982.