光ファイバ通信研究の回想

木村 達也[†]

Optical Fiber Communication Research — Recollections

Tatsuya KIMURA[†]

(Received October 19, 2009)

Optical fiber communication research since the demonstration of ruby laser oscillation is recollected. Several activities before the advent of fibers, development of long wavelength fiber systems, advanced system proposals including coherent detection and amplification, and device research oriented for a variety of functions are reviewed mainly based on author's experiences.

Key Words: Free space light propagation, Long wavelength fiber transmission, Coherent optical detection, Optical amplification, Optical functional device

1. はじめに

Maimanが具現化したルビーレーザー¹⁾はランダムスパイクよりなる数十msオーダのパルス発振であったものの、その赤いビームは高い指向性、単色性とコヒーレンスを明らかに示したので、さまざまな夢を描くに十分な衝撃をもたらした。光通信は当初より期待された最も大きな応用の一つであり、今日では光ファイバネットワークが社会基盤として確立されグローバルに拡大するに至っている。

よく知られているようにこれに続いて、半導体レーザーを始めとする各種レーザーの開発、LiNbO₃を始めとする光エレクトロニクス材料の開発、光ファイバの開発とその低損失化、半導体レーザーの連続発振、長波長帯伝送による長距離・大容量化、短距離から(海底を含む)長距離に至る商用導入、光増幅器の開発・導入による高性能化、波長分割多重化による超多チャンネル化などの輝かしい成果が達成されたものの、その後不幸にして過剰なファイバ布設によるITバブルが発生し、間もなくそれが崩壊した。この間に行われた通信事業規制の変化やグローバル化も大きな影響を与えた。

しかし光Mooreの法則とも呼ばれるように、インターネットの旺盛な需要を背景として挫折から徐々に再出発がはかられ、現在ではトリプルプレイサービスを可能にする光ファイバ加入者システムの拡大や、記憶域ネットワークやクラウドコンピューティングを実現する高度な都市内・都市間情報転送ネットワークの構築が進められ

ており、信頼性が高い光ネットワークの技術基盤が構築されつつある²⁾。この進展を支えたものは、個別材料・部品レベルの研究開発による光部品・サブシステムの高性能化、光集積や光・電気集積による小型化と経済化であり、さらに高性能・高機能なMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)部品、フォトリソグラフィなどの新技術が追求されている。

光部品からシステム・ネットワークに関して、最近の研究開発状況に関する解説は多数報告されており、例えば文献³⁾で詳細に論じられている。ここでは紙面の制約もあるので、広範囲の技術史を普遍的に解説することは意図せずに、主として研究者として筆者の目から見た初期の光通信研究開発を振り返って見たい。取り上げる話題や引用文献などには個人的考え方を反映していることを予めお断りしておく。

2. 光ファイバ前夜

ルビーレーザーの不規則な光パルスクラスタに代わって、CW発振He-Neレーザー⁴⁾が開発されて、特にその632.8 nm発振線が光通信応用の主な対象となった。多モード発振を利用してパルスが発生するモード同期⁵⁾で得られる繰返し速度100 MHzのパルスは非常に魅力的であった。私事で恐縮であるが、筆者は1962年から5年間大学院に在学して、レーザー、光変調器、光検波器を含む光伝送を想定した研究をおこなった。この間に最も印象に残っているのは、指導教官であった斉藤 成文先生

[†]元日本電信電話株式会社 基礎研究所長

[†]Ex Director, Basic Research Laboratories, NTT

の「通信で重要なのは(発振器もさることながら)検波器である」という、レーダ研究のご経験に基づく信念であった。これは筆者のその後の研究にも大きな影響を与えた。ちなみに大学院では干渉計を用いる光位相変復調の着想を得て、実験で実証した⁶⁾。これは位相変調の光遅延検波に相当し、後のコヒーレント光伝送研究につながった。

モード同期やLiNbO₃変調器などの要素技術を用いて、DentonとKinsel⁷⁾はPCM変調と光時分割多重化の実験を行った。筆者はこれら要素技術に着目してフォローしていたが、就職先の電電公社電気通信研究所(当時)で故新関 暢一氏によってLiNbO₃結晶が成長されたことと、トランジスタ回路製作の協力者が得られたことにより、100 Mb/sでPCM変調を行った。当時のトランジスタでは5 Vの100 Mb/s変調信号を得るのが精一杯であったが、機械研磨で作った細いLiNbO₃変調器を駆動できた。

当時この実験が一寸した話題になり、これを基にして伝搬条件の悪い都心で1~2 kmの長期空間伝搬実験が行われた。結論として、高信頼性の空間伝搬光通信が得られる距離はただか数百mであること、霧や伝搬ビーム揺らぎだけでなく、ビルの断熱ガラスによる減衰や送信側窓ガラスにつく雨滴による散乱が大きな影響を及ぼすことがわかった。光ファイバへの関心の高まりにより空間伝搬は忘れられたが、今でも簡易な短距離伝送手段として意味を持っている。

Kinselの論文⁷⁾では光時分割多重化の概念が提示された。これに対して筆者が持った問題意識は光周波数分割多重化の可能性であった。一つの試みとして、三段接続の複屈折光フィルタにより8チャンネルの送・受信光分波器(つまり波長分割多重化と多重分離装置)を作製して、20 GHz間隔(これは現在のITUグリッドの1/5である!)の超高密度多重化と多重分離を確認した⁸⁾。スペクトル幅13.5 GHzの信号に対して、チャンネル間クロストークは最大-15.5 dBに抑えられた。おそらくこれはWDMに関する世界初の実験と思われる。しかし個別光学素子では装置が大形で光学表面数が膨大になるため、集積化の必要性が改めて認識された。この研究の副産物として複屈折フィルタ温度安定化の着想を得た。同符号の複屈折と逆符号の温度変化を持つ二種類の結晶を組み合わせると、複屈折を減らさずに温度補償ができる⁹⁾。この構成の温度安定化複屈折フィルタは現在市販されている。

3. 光ファイバの出現

2009年のノーベル物理学賞を受賞したKaoらによる光ファイバの予測¹⁰⁾に続いて、Corning社において1970年に20 dB/km、1972年に4 dB/kmのシリカ光ファイバが得られたことが報告された¹¹⁾。しかしこの光ファイバ性能を再確認して、実験に使用するまでに数年を要した。よく知られているように、同じ年にGaAs/AlGaAs半導体レーザーで連続発振が報告され¹²⁾、当時のファイバ最低損失と同波長の光が得られた。これについても長寿命デ

バイスを得るのに数年を要した。この間にファイバ特性の理解やファイバ取扱い技術の開発が進み、GaAs半導体レーザーについても100 Mb/s前後の送信器を構成する見通しが得られ始めた。

次の関心事はこれを用いて実用システムが構成できる見通しと、そのときの要求条件を明らかにするいわゆる「方式検討」である。シリカファイバとGaAs半導体レーザーを前提として、個別構成部品の性能と送・受信器構成、送・受信レベルと損失割当て、達成可能な符号速度と伝送距離、方式信頼性と部品への要求値、方式適用領域、他方式との経済性比較を総合的に評価して、短距離と長距離方式において、既存システムや当時開発中の方式に勝る性能が得られる見通しを定量的に示した¹³⁾。その後間もなく、この分野は所内の実用化部門に移管され、32 Mb/sと100 Mb/sシステムが実用化された。ここでGaAsレーザーの長寿命化¹⁴⁾が信頼性の鍵であったことと並んで、地味ではあるが高速・低雑音Si-APD検波器¹⁵⁾が高性能受信に重要な役割を果たした。

4. 長波長帯の開拓

光ファイバ開発の初期から、GaAsレーザーの850 nmより長い波長でファイバを使う可能性に注目して、筆者は固体光源励起のNd:YAGレーザーやGe-APD(Avalanche Photodiode)の研究を進めていた。前者については波長が整合した励起光源が得られずあまり進捗しなかったが、高Nd密度のLNP結晶¹⁶⁾が開発されてレーザー励起による連続発振が得られた。後者については後で述べる。Rayleigh散乱が小さくファイバ損失の低下が予想された長波長で、高性能方式が期待された。この観点は1000 nm帯半導体レーザーの研究¹⁷⁾に影響を与え、InGaAsP/InP半導体レーザー¹⁸⁾や低損失光ファイバ¹⁹⁾の開発につながった。ファイバの高純度化が進むに伴って最低損失波長が1300 nm帯から1550 nm帯に伸びて、同時に不純物吸収による波長限界も明らかになった。

GaAsレーザーを用いる方式と区別するために、波長1000 nm以上の光搬送波を用いる方式を長波長帯光ファイバ伝送方式と名付けて、1300 nmを主な対象として方式検討²⁰⁾を進めると共に、入手可能な光源を用いて1000 nmから1550 nmに至る伝送実験を順次行って、長距離・高速伝送の優れた性能を実証した²¹⁾。長波長領域の開拓に伴って、他の有線・無線伝送方式に対する光の優位性が確立された。

長波長帯の課題は半導体レーザーの実現と、Ge-APDの雑音であった。III-V族デバイスの作製技術が進んでいたことや、InGaAsP系材料では信頼性に問題が少なかったために、間もなく長波長帯半導体レーザーが得られるようになった²²⁾。Ge-APDはかなり前に新美 達也氏らにより表面不活性化技術の応用として開発されており、その後筆者のグループがその研究を引き継いだ。当時Ge-APDが利用できたのは世界中で筆者のグループだけであり、これが長波長帯で大活躍することになった。一部には雑音が大きいのでGe-APDは使えないと誤解す

る向きもあったが、(信号電流と暗電流の単純比較ではなく)識別電気回路における暗電流雑音と過剰ショット雑音を正確に評価すると、当時のGe-APDでもシステム実験に十分耐えるものであり、800 Mb/sを始めとして2 Gb/sに至るシステム実験で広く使用できた。一方、Ge材料固有の性質によりこれ以上の雑音改善が望めないのも、並行してInGaAs/InP-APDの開発を進めた²³⁾。光ファイバ伝送の研究で米国を凌ぐ性能が得られ始めたのはこの時期からである。長波長帯方式の研究によってその明るい見通しが得た後で、開発の意向を示した実用化グループにこの分野を移管した。

5. 高性能伝送方式

光通信研究の初期から一般に光ヘテロダイン方式が折りに触れて論じられてきたが、上下側帯波を含めて広帯域を占有する割には信号帯域幅が限られるので、研究の中心はベースバンド変調であった。大学院で位相変復調の研究を行った経緯もあり、筆者はかねてより振幅、周波数、位相のデジタル変調波の直接(遅延)、ヘテロダイン、あるいはホモダイン検波をする受信性能の比較解明に関心を持っていた。基礎研究部で研究室を任されたのを機会として、このテーマを山本 喜久氏に提示したところ、彼はほぼ完全な理論を作ってくれた²⁴⁾。この方式構成とその部品に関する要求条件を具体的に検討するために、研究室有志を集めてブレンストーミングをしてもらった。その結果、半導体レーザーのスペクトル性能を改善して高性能方式を得るという方向性を得て、この方式を(ネイティブスピーカの助言を得て)コヒーレント光ファイバ伝送方式と呼ぶことにした²⁵⁾。その後多くの大学や企業でこの分野への関心が高まり、実用化部門も興味を示したので移管をした。しかし次に述べる光増幅に比べて高性能部品が必要になるので、実用化には至っていない。この間に光部品のスペクトルを始めとする諸特性が著しく向上したことは注目すべきである。

もう一つの高性能方式への試みは光増幅であった。当時光増幅は雑音が多く通信には使えないというのが一般的見方であった。おそらくその理由は、自然放出係数が周波数の3乗に比例して増加するために光雑音が非常に大きい印象を与えることと、最適な雑音帯域で(電気)信号対雑音比を評価していなかったためである。この誤解は非常に強く、筆者に増幅器研究の中止を忠告する方もおられた。このテーマについても中継器および前置増幅器としての増幅器の雑音を解析して、多段増幅中継も可能であることを示した²⁶⁾。よく知られているように、増幅中継にはその後に現れたエルビウム添加ファイバ増幅器が広く使われるようになり、それが長距離・大容量伝送システム構築の主役となった。

6. 高機能サブシステム

これらの研究にはスペクトル性能に優れた半導体レーザー部品が必要であると考えて、半導体レーザーの高機

能化・高性能化に研究の中心を置いた。この中から、外部共振器半導体レーザー²⁷⁾、注入同期半導体レーザー²⁸⁾、半導体レーザースイッチ²⁹⁾、長波長DFB(Distributed Feedback)レーザー³⁰⁾などの重要な技術の目が見られた。その後ほぼ完全な反射防止膜が可能になり³¹⁾、多波長増幅や非線形性利用の道が開かれた。半導体レーザー増幅器は現時点でまだ本格的な実用になっていないが、集積可能な小形増幅器としての可能性や、スイッチ素子、波長変換素子などのユニークな機能を始め、高効率・広帯域の増幅中継器として今後の発展が期待されている。

光ファイバの研究開発が峠を越えた頃に、伊澤 達夫氏と森 英史氏によりシリカ堆積技術とイオンビームエッチングを利用して光導波回路プラットフォームを作る試みが提案され、単一モードと多モード導波回路を作製する技術を確認した³²⁾。この技術は実用化グループに移管された後、Siウエハ基板を用いる平面光波回路として、AWG(Array Waveguide Gratings)を始めとする伝送基幹部品分野に成長している。

7. 今後の展望

紙面の制約もあり、ここでの記述は1980年代初頭までの光ファイバ伝送における技術の種の形成段階で終わってしまい、その後に花開いた技術展開には触れることができなかった。最初に述べたようにその後の開発によって、エルビウム添加ファイバ増幅器の開発と高密度波長分割多重化の導入、受動光ネットワークの開発により、長距離から短距離系や加入者系に至るネットワークを光で構成する技術が得られた。今後ダイナミックに大容量データに対応できる経済的な統合ネットワークを目指した技術を開発して、インターネットサービスの要求に応えるには、大規模で高機能な光部品や光サブシステムにおけるフォトリソ集積、光・電気集積回路、インターネットアーキテクチャとの融合を始めとする新たな段階の研究開発が重要になるであろう。

参考文献

- 1) T. H. Maiman: *Nature* **187** (1960) 4736, 493.
- 2) たとえばJ. R. Vacca, *Optical Networking Best Practices Handbook* (John Wiley & Sons, Inc., 2007). 木村 達也訳: 光ネットワークの活用技術(オーム社, 2008).
- 3) I. P. Kaminow et al. (ed): *Optical Fiber Telecommunications, vol. V, A: Components and Subsystems, B: Systems and Networks* (Academic Press, 2008).
- 4) A. Javan et al.: *Phys. Rev. Lett.* **6** (1961) 106.
- 5) L. E. Hargrove et al.: *Appl. Phys. Lett.* **5** (1964) 4.
- 6) S. Saito and T. Kimura: *Proc. IEEE* **56** (1968) 1048.
- 7) R. T. Denton et al.: *Proc. IEEE* **56** (1968) 140; T. S. Kinsell et al.: *Proc. IEEE* **56** (1968) 146.
- 8) T. Kimura et al.: *Appl. Opt.* **12** (1973) 373.
- 9) T. Kimura et al.: *Proc. IEEE* **59** (1971) 1273.
- 10) K. C. Kao et al.: *Proc. IEE* **113** (1966) 1151.
- 11) F. P. Kapon et al.: *Appl. Phys. Lett.* **17** (1970) 423.
- 12) I. Hayashi: *Appl. Phys. Lett.* **16** (1970) 109.
- 13) T. Kimura: unpublished.
- 14) Y. Furukawa et al.: *Jpn. J. Appl. Phys.* **16** (1977) 1495.
- 15) H. Kanbe et al.: *IEEE Trans. ED* **23** (1976) 1337.

- 16) T. Yamada et al.: J. Appl. Phys. **45** (1974) 5096.
- 17) K. Sugiyama et al.: Jpn. J. Appl. Phys. **11** (1972) 1057.
- 18) J. J. Hsieh et al.: Appl. Phys. Lett. **28** (1976) 709.
- 19) M. Kawachi et al.: Electron. Lett. **13** (1977) 442.
- 20) T. Kimura, et al.: Opt. Quant. Electron. **9** (1977) 33.
- 21) M. Saruwatari et al.: Electron. Lett. **14** (1978) 187.
- 22) K. Oe et al.: Jpn. J. Appl. Phys. **16** (1977) 1273.
- 23) H. Kanbe et al.: Electron. Lett. **16** (1980) 163.
- 24) Y. Yamamoto: IEEE J. Quantum Electron. **16** (1980) 1251.
- 25) S. Saito et al.: Electron. Lett. **16** (1980) 826. Y. Yamamoto et al.: IEEE J. Quantum Electron. **17** (1981) 919.
- 26) Y. Yamamoto: IEEE J. Quantum Electron. **16** (1980) 1073.
- 27) M. Ito, et al.: IEEE J. Quantum Electron. **16** (1980) 69.
- 28) S. Kobayashi et al.: Electron. Lett. **16** (1980) 668.
- 29) M. Ikeda: Electron. Lett. **17** (1981) 899.
- 30) O. Mikami et al.: Electron. Lett. **19** (1983) 213.
- 31) T. Saitoh et al.: Electron.Lett. **23** (1987) 218.
- 32) T. Izawa et al.: Appl. Phys. Lett. **38** (1981) 483.