

3-6 次世代フォトニックネットワークに向けた光変調器の開発

3-6 *Advanced Optical Modulators for Next-generation Photonic Networks*

川西哲也 坂本高秀

KAWANISHI Tetsuya and SAKAMOTO Takahide

要旨

情報通信研究機構 (NICT) 独自デバイスである光周波数シフトキーイング (FSK) 変調器を利用した高度な光制御技術による、光パケット制御、超高密度伝送への応用についての最新の研究成果を紹介する。光 FSK 変調器は光周波数、位相、振幅の高速制御を実現するもので、様々なタイプの信号を高速・高精度に発生させることが可能である。光 FSK ラベル信号処理、可変光パケットバッファ、4 値差動位相変調方式 (DQPSK) による 100GbE に対応可能な超高速信号発生、波長多重に適した位相連続 FSK 信号発生への応用例を示す。

This article describes recent research activities using an NICT novel optical device, the optical frequency-shift-keying (FSK) modulator, which can provide high-speed control of optical frequency, phase and amplitude. The FSK modulator can generate various types of high-speed optical signals, precisely. We show a couple of examples of recent results on applications of the FSK modulator for next-generation optical communications systems, such as, optical FSK label processing, tunable optical buffer techniques, high-speed differential quadrature-phase-shift-keying (DQPSK) signal generation for 100GbE and continuous-phase FSK signal generation for dense wavelength-domain-multiplexing.

[キーワード]

光変調器, 光ラベル, バッファ, 位相, 周波数

Optical modulator, Optical buffer, Optical label, Phase, Frequency

1 はじめに

ADSL、FTTH などの高速インターネット接続サービスが急速に普及し、家庭においても常時接続が可能となり、様々なサービスが提供されている。大きな伝送容量を必要とするものとしては、ネットワーク上での音声・動画の利用拡大が挙げられるが、音声に関してはメーカー各社が、携帯オーディオ機器の主力を、Mp3 などを利用したものにシフトさせ、音楽のネット配信サービスをスタートさせている。音声が既存のオーディオ機器と同程度のクオリティのサービスをインターネットで実現しているのに対して、動画配信には更なるネットワークの能力向上が必須で、デジタ

ルハイビジョン動画配信を普及させるためには革新的な光デバイス開発が不可欠である。既に、光通信技術は国際通信から家庭向けの FTTH まで様々な分野で活用されているが、光信号は専らポイントトゥポイントの伝送実現のために利用され、複雑な処理は、いったん電気信号に変換し、電子回路で行うという手法がとられている。この電子回路での処理がボトルネックとなっており、これの解決のための様々な研究が進められている。周知のとおり、光は波動としての性質と、粒子としての性質を有するが、既存の光通信システムではこれらを生かすことなく、光の ON、OFF の二つの状態だけを利用するものが大部分である。ここでは光の波動的性質を積極的に活用し、

伝送容量の拡大とともに、光信号処理に必要な新機能を実現する超高密度基盤技術について述べる。波動の三つの要素：強度・位相・周波数(波長)のすべてを自由に操作するための NICT 独自デバイスについて解説し、これを利用した超高密度伝送システム、パケットシステムなども紹介する。

2 超高密度光波通信基盤技術

ワイヤレス技術分野では電波の波動性を高度に利用したシステムが幅広く実用になっているのに対して、光通信技術分野では光波としての性質を積極的に活用した実用システムが極めて少ないのが現状である。波動の三つの要素：強度・位相・周波数(波長)の中で、強度変化を情報伝送に用いるものが実用システムのほとんどで、最先端の研究ではこれに加えて位相変化を活用し長距離大容量伝送システムの性能向上を目指すものが報告されている。しかし、周波数変化(波長変化)の利用は極めて低調である。これは高速で光周波数制御を実現するデバイスが存在していなかったためであるが、2004年3月に NICT は超高速光周波数制御デバイス(光 FSK 変調器)の開発に成功し、既にメーカーへの技術移転を完了し、変調デバイスとして商品化されている。これまでに、このデバイスを用いた、高速光周波数シフトキーイング(FSK)伝送実験や、光パケットシステム向け光強度変調(IM)信号、光 FSK 信号同時伝送実験を行っている。光 FSK 変調器の開発により、光波の強度・位相・周波数を高速かつ高精度に制御することが可能となり、ワイヤレス技術における信号処理と比肩し得る複雑な機能の実現が期待できる(図1参照)。

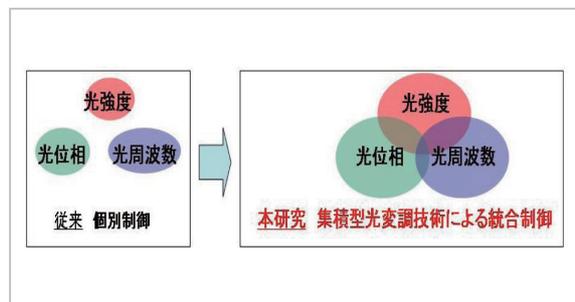


図1 光波の3要素(強度・位相・周波数)の統合制御

3 光 FSK 変調技術

光 FSK 変調器は図2に示すような四つの光位相変調器を集積したもので、三つの電極を持つ。そのうちの二つの電極(RFaとRFb)に位相が90度ずれた高周波電気信号を供給すると、その信号の周波数分(変調周波数)だけ、光周波数がシフトした出力光が得られる。シフトの方向(周波数が高い成分：USB又は周波数が低い成分：LSB)は残りのもう一つの電極(RFc)に印加する電圧で制御できる。光シフト方向の切替えが高速で実現するために電極には進行波構造(光と電気信号を同じ速度で同じ方向に進行させ高速動作を可能とする)を採用した[1]。

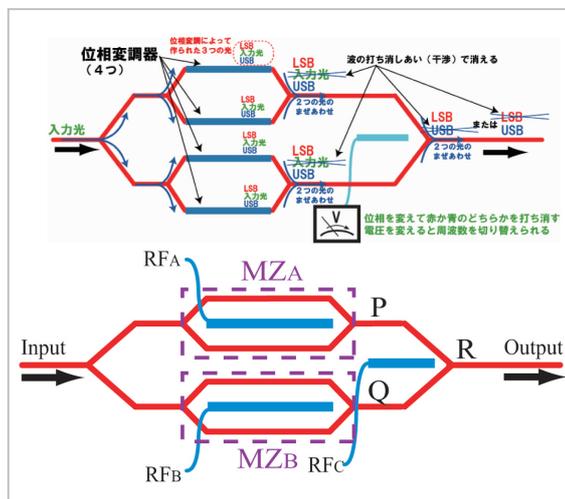


図2 光 FSK 変調器。上：模式図。下：デバイス構造。

図3に動作原理を示す。横軸は周波数、矢印の方向は位相を、点線は入力光の周波数を表す。P点、Q点ではUSB、LSBの両成分が発生する。光出力(R点)ではLSB成分のうちP点からのものとQ点からのものが180度の位相差を持ち(符号が逆)、互いに打ち消しあう。結果として、USB成分のみが出力される。LSB、USB成分の位相関係は電極RFcの電圧で制御可能である。図4はUSB成分が打ち消しあい、LSBを出力する場合を示す。この切替え速度は電極RFcの応答速度に依存する。また、周波数変化量の上限は電極RFaとRFbの動作可能周波数に依存する。NICTで試作、評価した光 FSK 変調器の電極特性はRFa、RFb、RFcとも動作可能周波数(3 dB帯域)約18 GHz、

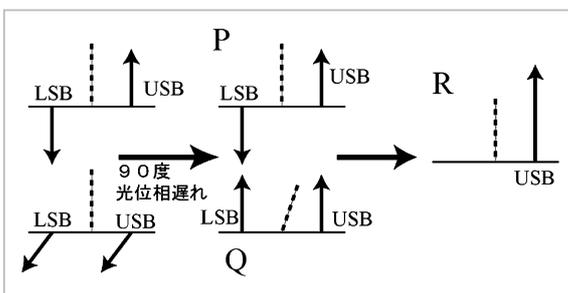


図3 光 FSK 変調器の動作原理 (USB: 周波数が高い方向にシフトした成分の発生)

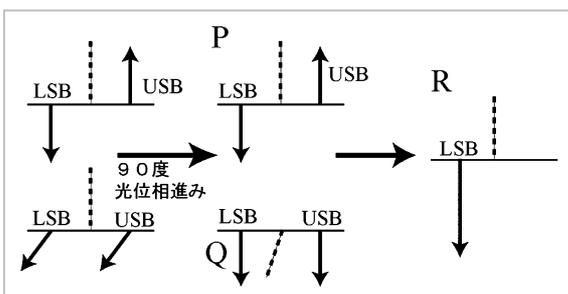


図4 光 FSK 変調器の動作原理 (LSB: 周波数が低い方向にシフトした成分の発生)

切替え可能速度 55 ピコ秒程度であった。

出力光は位相変調の高調波発生により不要な成分をわずかに含むが、3 倍波を同時供給することでこの影響を更に抑えることが可能である。これにより周波数変化量 7.5 GHz において、変換効率 -12.9 dB、不要な周波数成分の抑圧比 33.7 dB を実現している [2]。図 5 に光 FSK 伝送の実験系構成を示す。シングルモードファイバ (SMF) 95 km 分散補償なしで 10 G ビット/秒 FSK 信号のエラーフリー伝送を実現した。周波数変化量は 12.5 GHz であった [3]。USB、LSB の両方の信号を活用したバランス受信では更に受信感度向上を図ることが可能で、130 km 伝送を実現している [4]。

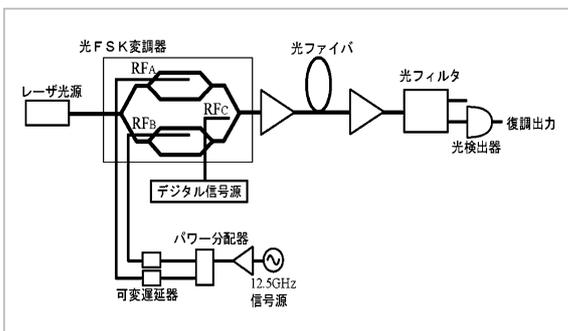


図5 10 G ビット/秒 FSK 伝送実験

4 光 FSK 変調技術による光ラベル処理

FSK/IM 信号 (IM 信号はペイロード、FSK はラベル信号用) は直列に接続された光 FSK 変調器と光強度変調器で発生可能である。図 6 に実験系と測定結果 (復調された IM、FSK 信号の波形、ラベル除去後の信号波形) を示す。IM 信号は 10 G ビット/秒、FSK 信号は 1 G ビット/秒であった。FSK/IM 信号は直接、光検出器に入力すると IM 信号成分が復調される。FSK 信号は USB と LSB を弁別できる光フィルタを通して FM-IM 変換を行うことで、光検出器で復調できる。FSK 信号、IM 信号ともエラーフリー復調が可能であることを確認した [5]。

FSK/IM 信号に搬送波抑圧両側波帯変調 (入力成分が干渉で抑えられた強度変調) を施し、光フィルタで入力光と同じ成分周波数を取り出すと、FSK 信号の状態に依存しない純粋な IM 信号と同等のものが得られる。図 6 に示すように、復元された FSK 信号を含まない IM 信号において良好な波形が得られ、エラーフリー復調を確認した。復元された IM 信号を別の FSK 変調器に入力することで新たな FSK 信号を重畳させることができる。この方法で光信号を電気信号に変換することなくラベル情報 (FSK 信号) を変化させること (ラベルスワップ) が可能となる [5]。

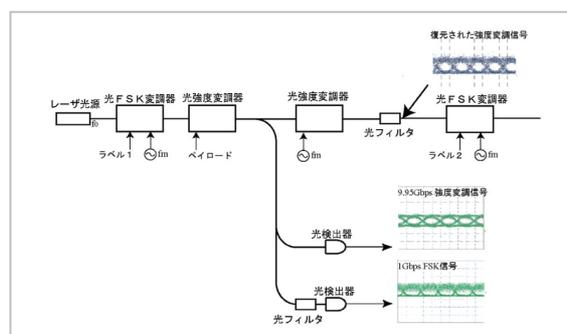


図6 光 FSK 変調を用いた光ラベル伝送とラベルスワップ

5 高密度伝送技術

周波数変位量が FSK 信号のビットレートより大きい場合 (ワイドバンド FSK) には両成分の

周波数軸上での重なりはほとんどなく、スペクトル形状は各成分間の位相関係に依存せず、位相変化が与える復調特性への影響も小さいと考えられる。周波数利用効率の向上には周波数変位量が小さいFSK(ナローバンドFSK)が有効であるが、USB、LSBの両成分が重なり合うため、スペクトル形状及び復調特性が両成分間の位相関係に大きく依存する。周波数切替え時に位相連続性が確保されたFSK信号(CPFSK)はスペクトルがコンパクトで復調特性も優れるという特徴を持つ。FSK変調器では光周波数切替え時の光位相連続は一般には確保されず急激な位相変化を伴うが、USB、LSB成分発生のための信号(RFaとRFb)と周波数切替えのためのベースバンド信号(RFc)を同期させることでCPFSK信号の発生が可能である[6]。周波数シフト量はビットレート B の半分、つまり、USBとLSBの周波数間隔が B と等しくなるようにし、切替えをUSB、LSBの位相が一致するタイミングに行う。CPFSKでは常に位相が連続的に変化していて、その変化量は1ビットで180度である。図7に10Gビット/秒CPFSK変調実験結果を示す。他機関で広く研究されている位相変調方式(DPSK)と同程度の感度が得られることを確認している。また、CPFSKはDPSKに比べて高域成分の抑圧が大きいことが特徴であり、高密度伝送の際に隣接チャネルへの干渉を低減させる効果が期待できる。CPFSK変調では周波数切替え時の位相が連続的に変化させることが重要なポイントであったが、逆に切替え時の急激な位相変化を積極的に利用した光によるUWB(ウルトラワイドバンド)信号発生も可能である[7]。

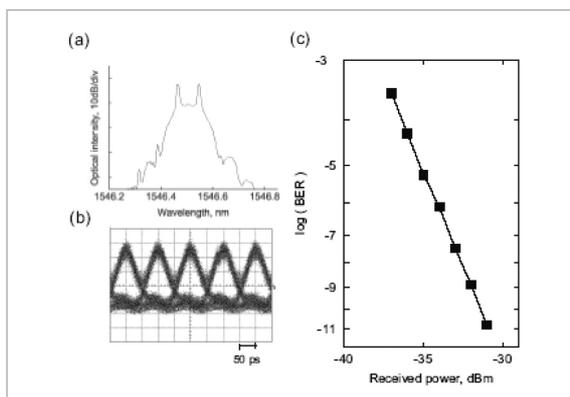


図7 光CPFSK変調を用いた高密度伝送 (a)光スペクトル、(b)復調信号波形、(c)ビット誤り率

更なる高速化と複雑な機能の実現を目指し、40Gビット/秒以上の高速信号に対応可能な多機能変調器の開発にも成功しており、これを用いた40Gビット/秒光FSK変調を実証した[8]。この変調器は周波数変調をはじめとして、振幅・強度変調、さらには多値位相変調を精密に行うことが可能である。次世代イーサネット規格100GbEへの対応を目指した100Gビット/秒DQPSKを実現している[9]。1チャンネル当たりの伝送速度では世界最高水準であり、周波数利用効率の高い信号形式を利用したものとしては世界最高速度である。この多機能変調器は2006年3月時点で圧倒的に世界最高速で光位相、周波数を制御できるデバイスである。その正確さも特筆すべきで、下記に示す80Gビット/秒DQPSK変調方式による伝送実験においても、従来の複数の変調器を組み合わせる方法に比べて出力光のクオリティ：図8(a)が高いことが大きな特徴である。

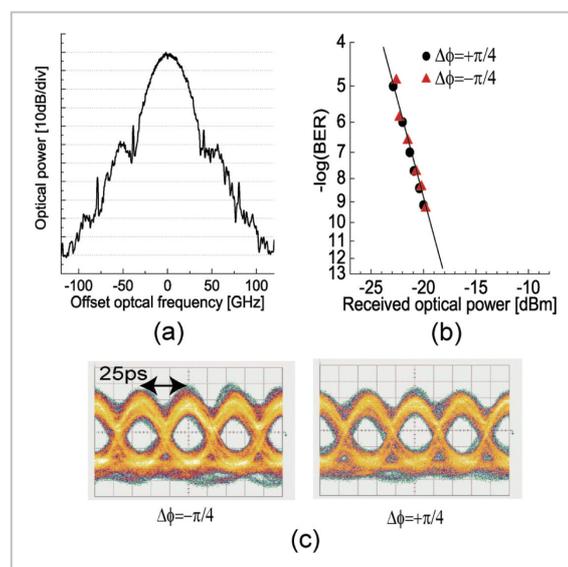


図8 DQPSK変調を用いた高密度80Gビット/秒伝送 (a)光スペクトル、(b)ビット誤り率、(c)復調信号波形

6 可変ディレイ技術

次に、変調器による光周波数制御を用いた可変光ディレイを紹介する[10]。光パケット交換においては衝突回避のために可変光ディレイを用いて、光パケットバッファが構成される。これまでに複数のファイバを切り替えるものや、多数の光

源を用いたものが提案されているが構造が複雑であるなどの問題点があった。これに対し光SSB変調器(光周波数シフタ)を用いると遅延量が電氣的に制御可能なシンプルな構成の可変ディレイが実現可能である。図9に示すように光SSB変調器を備えた光ファイバループと、二つのサーキュレータとその間に設けたファイバブラッググレーティング(FBG)からなる光入出力部を持つ。FBGの反射帯域内の光は光ループ内では周回し、光入力ポートから入力された場合にはFBGで反射されループに入ることなく光出力ポートから出力される。反射帯域外の光は光入力ポートから光ループへ、また、光ループから光出力ポートへと進む。したがって、反射帯域内の光は光ループに入らずに出力されるのに対して反射帯域外の光は光入力ポートから光ループを経由するのでループ1周分の時間遅延をもって出力される。光SSB変調器を動作させるとループ内で光周波数をシフトするので、入力された反射帯域外の光を反射帯域内のものに変換することが可能である。図10にループを周回する光のスペクトルの様子を示した。反射帯域からわずかにずれた光周波数を持つ入力光は光SSB変調器によってその光周波数が変化し、ループを周回する。周回している間にも光周波数は変化し続けるので、ある周回数に達すると光周波数が再び反射帯域外のものとなり、ループを出て、出力ポートから取り出される。反射帯域幅を f_r 、光SSB変調器による光周波数シフト量を f_m とすると、 $n f_m > f_r > (n-1) f_m$ の関係が成り立つときに n 回周回するので、 f_m を変化させることで周回数を制御できる。入力光をパルスで強度変調し、出力光の時間波形からループでの遅延量の変化を測定した。図11に示すようにRF信号周波数 f_m により遅延量が制御できることが確認できる。

6 まとめ

次世代フォトニックネットワークにおける重要な要素技術となり得る高速光変調技術とその応用技術について述べた。光の波動としての性質(振幅・位相・周波数)のすべてを高度に制御することが可能となってきた。光変調器のこれまでの大きな役割は電気信号で表現された情報を光にコピー

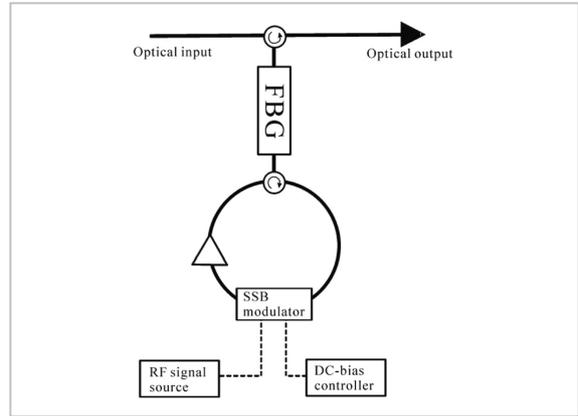


図9 可変ディレイの構成

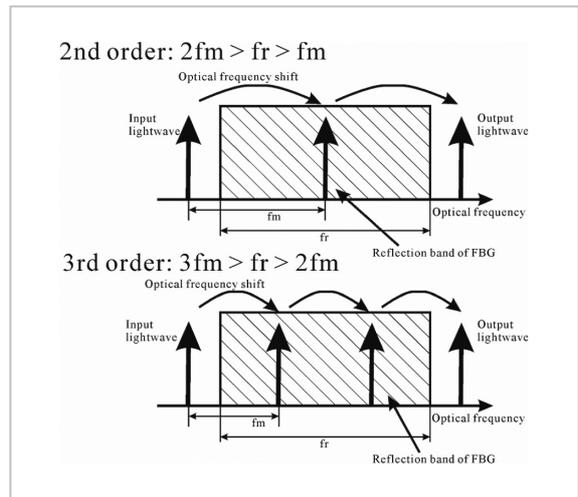


図10 可変ディレイの原理

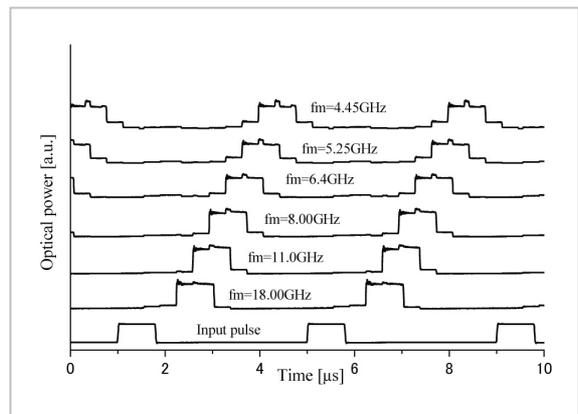


図11 遅延制御された光信号

一するというものであったが、今後は信号の加工・制御をはじめする様々な分野で利用されると考えられる。そのためには各目的に最適化された新しい構造を持った変調器の研究開発を強力に進めていくことが重要であろう。

参考文献

- 1 T.Kawanishi, K.Higuma, T.Fujita, J.Ichi-kawa, T.Sakamoto, S.Shinada, and M.Izutsu, "LiNbO3 high-speed optical FSK modulator", Electron. Lett., 40, 691-692, 2004.
- 2 T.Kawanishi and M.Izutsu, "Linear single-sideband modulation for high-SNR wavelength conversion", IEEE Photon. Tech. Lett. 16, 1534-1536, 2004.
- 3 T.Fujita, T.Kawanishi, K.Higuma, J.Ichi-kawa, S.Shinada, T.Sakamoto, and M.Izutsu, "10Gbit/s FSK transmission over 95km SMF using a LiNbO3 modulator", IEICE Electron. Express, 2, 32-36, 2005.
- 4 T.Kawanishi, T.Fujita, K.Higuma, J.Ichi-kawa, T.Sakamoto, and M.Izutsu, "Optical FSK transmission with group delay compensat-ed balance detection", IEICE Electron. Ex-press, 2, 333-337, 2005.
- 5 T.Kawanishi, K.Higuma, T.Fujita, J.Ichi-kawa, T.Sakamoto, S.Shinada, and M.Izutsu, "High-speed optical FSK modulator for optical packet labeling (invited)", IEEE/OSA J. Lightwave Technol. 23, 87-94, 2005.
- 6 T.Sakamoto, T.Kawanishi, T.Miyazaki, and M.Izutsu, "Novel Modulation Scheme for Optical Continuous-Phase Frequency-Shift Keying", OFC 2005, OFG2.
- 7 T.Kawanishi, T.Sakamoto, and M.Izutsu, "Ultra-wide-band radio signal generation using optical frequency-shift-keying technique", IEEE Microwave and Wireless Components Lett., 15, 153-155, 2005.
- 8 T.Kawanishi, T.Sakamoto M.Izutsu, K.Higuma, T.Fujita, S.Mori, S.Oikawa, and J.Ichikawa, "40Gbit/s Versatile LiNbO 3 Light-wave Modulator, ECOC 2005, Th2.2.6.
- 9 M.Daikoku, I.Morita, H.Tagu, H.Tanaka, T.Kawanishi, T.Sakamoto, T.Miyazaki, and T.Fujita, "100Gbit/s DQPSK Transmission Ex-periment without OTDM for 100G Ethernet Transport", OFC 2006 PDP36.
- 10 T.Kawanishi, S.Oikawa, K.Higuma, and M.Izutsu, "Electrically Tunable Delay-line using an Optical Single-Sideband Modulators", IEEE Photon. Tech. Lett., 14, 1454-1456, 2002.



かわにし ともや
川西哲也

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波 ICT グループ主任研究員 (旧基礎先端部門光情報技術グループ主任研究員) 博士(工学)
高速光変調技術の開発



さかもと たかひこ
坂本高秀

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波 ICT グループ研究員 (旧基礎先端部門光情報技術グループ専攻研究員) 博士(工学)
高速光変調技術の開発、光通信