

10Gb/s伝送用マルチモード光ファイバ

光電子技術研究所 官 寧^{*1}・竹 永 勝 宏^{*1}・松 尾 昌一郎^{*1}・姫 野 邦 治^{*2}
光ファイバ事業部 中 山 真 一^{*3}

Multimode Fibers for 10Gb/s Transmission

Dr. N. Guan, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Himeno & M. Nakayama

0.85 μm 帯において10Gb/sの光信号を300m～550m伝送可能なGI (Graded-Index) 型マルチモードファイバFutureGuide[®]-MM10Gを開発した。本ファイバはIEEE802.3aeにおける10GBASE-Sをサポート可能である。本ファイバの帯域仕様は非常に厳しく、また帯域保証のためのDMD (Differential Mode Delay) 測定が必要である。われわれは正確な理論モデルに基づいてファイバの設計を行い、新たにDMD測定装置も開発した。本報では、10Gb/s伝送用GIファイバの評価および設計手法を紹介し、製造したファイバの特性および伝送実験の結果について報告する。

The graded-index multimode fiber FutureGuide[®]-MM10G available for 300m ~ 550m transmission for 10Gb/s signal at 0.85 μm wavelength has been developed. Fabricated fibers are qualified to a DMD (Differential Mode Delay) measurement and hence support the 10GBASE-S in the standard IEEE802.3ae. In order to develop this highly specified fiber, we have applied a theoretical model and constructed a DMD measurement set-up. In this paper, we will demonstrate the evaluation and the design and show the specifications of fabricated fibers and the result of a transmission experiment as well.

1. ま え が き

近年、インターネットの普及によるブロードバンドアクセスが増大し、伝送容量のさらなる需要拡大が予想されている。長距離幹線系においては、光ファイバの敷設が一巡し、波長多重技術を用いた大容量伝送システムにより通信容量が飛躍的に増大した。一方アクセス系ではSONET / SDHに比べて低コストである高速光イーサネット技術に期待が寄せられ、その伝送速度は従来の1Gb/sから10Gb/sへと高速化している。特に、短距離LANの領域では安価なVCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) を使用した波長0.85 μm での10ギガビットイーサネット (10GbE) 伝送、すなわちIEEE802.3ae¹⁾における10GBASE-Sが低コストな高速LAN用として脚光を浴びている。

われわれはこの高速化に対応した新型マルチモードファイバ (Multimode Fiber, 以下MMFと記す) FutureGuide[®]-MM10Gを開発した。MMFはシングルモードファイバ (Single-Mode Fiber, 以下SMFと記す) に比べるとコア径が大きく、NA (Numerical Aperture: 開

口数) が大きいので、接続が容易である一方、複数のモードが伝搬可能であり、SMFよりも伝送帯域が狭いため、主に安価な短距離伝送システムに用いられる。また、従来のMMFは屈折率分布の制御が不十分であるため、10Gb/sのような大容量伝送に用いると、きわめて短い距離にしか使用できない。われわれが開発した新型MMFは0.85 μm 帯において10Gb/sの光信号を300m～550m伝送可能であり、また、新しいDMD (Differential Mode Delay) 測定²⁾に基づく帯域保証により、10GBASE-Sのサポートを保証している。新型MMFはコア径50 μm 、最大屈折率差1%となる α 状屈折率分布をもつ点で、構造的に従来のものとほぼ同じであるにもかかわらず、表1に示すように

表1 50/125マルチモードファイバの主な仕様の比較
Comparison of specifications of multimode fibers

項 目	10Gb/s伝送用	10Gb/s伝送用
使用波長 (μm)	0.85	0.85
伝送レート (Gb/s)	1.25	9.95328/10.3125
リンク長 (m)	550	300
全モード励振最小帯域 @0.85 μm (MHz \cdot km)	500	1,500
DMD最小実効帯域 @0.85 μm (MHz \cdot km)	N.A	2,000

*1 光プロセス研究部

*2 光プロセス研究部グループ長

*3 光製造技術部

従来のものよりはるかに厳しい仕様を満たすことができる。われわれは従来のMCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) 法ではなく、より精密に屈折率分布が制御できるPCVD (Plasma Chemical Vapor Deposition) 法を用いて、この厳しい仕様が要求されているファイバを製造している。また、ファイバを設計するために有限要素法³⁾を用いて正確にファイバの特性を算出できるシミュレータを作成し、さらにファイバを評価するために新たにDMD測定装置を開発した。本報では、10Gb/s伝送用MMF開発に関わるファイバ評価および設計手法とともに、製造したファイバの特性および伝送実験の結果について報告する。

2. DMD測定

新型MMFは0.85 μm帯のVCSELの使用を前提としている。VCSELは従来使用されていたLEDに比べてスポット径が小さく、ファイバ屈折率分布の局所的な微小変動でも伝送特性に影響を与えるおそれがあるため、全モード励振による帯域測定では不十分である。このため、異なる励振状態に対して実効帯域を評価可能なDMD測定が必要となる⁴⁾。

DMD測定はまずごく限られた励振スポットを被測定MMFに対して径方向にオフセットさせながら図1のようなパルス応答を測定する。オフセットが小さいところでは主にMMFの低次モードが励振されるが、オフセットが大きいくところでは高次モードが支配的になるので、この結果からモード間の遅延時間差が測定できる。具体的には、DMD値は応答波形より次のように算出される：

$$DMD = (T_{SLOW} - T_{FAST}) - T_{REF}$$

ただし、 T_{SLOW} 、 T_{FAST} はそれぞれオフセット径Rが R_{INNER} 、 R_{OUTER} 間の最小立ち上がりエッジおよび最大立ち下りエッジであり、 T_{REF} は初期入射パルスの幅および波長分散によるパルスの広がりによって決まる参照幅である。実効帯域の合否は表2に示すDMDマスクテンプレートのいずれかを満たすかどうかで判定される²⁾。

図2にわれわれが構築したDMD測定系を示す。光源にはスペクトル幅が小さく短パルスが出力できる0.85 μm帯半導体DBR (Distributed Bragg Reflector) レーザを使用する。光パルスはスポットサイズがモードフィールド径が5 μm程度の励振用SMFによって絞られ、位置精度が0.2 μm以下の調心ステージによって被測定MMFにオフセット入射される。また、受光側ではGaAs-PINフォトダイオードが使用され、光インパルス応答はサンプリングオシロスコープによって記録される。図3にαは新型MMFと同等であるが屈折率分布にゆらぎのあるMMF (ファイバa: 全モード帯域3,840MHz・km)、αの異なるMMF (ファイバb: 全モード帯域1,900MHz・km) および新型MMF (ファイバc: 全モード帯域7,930MHz・km) についてDMD測定結果を示す。全モード帯域が高いファイバ

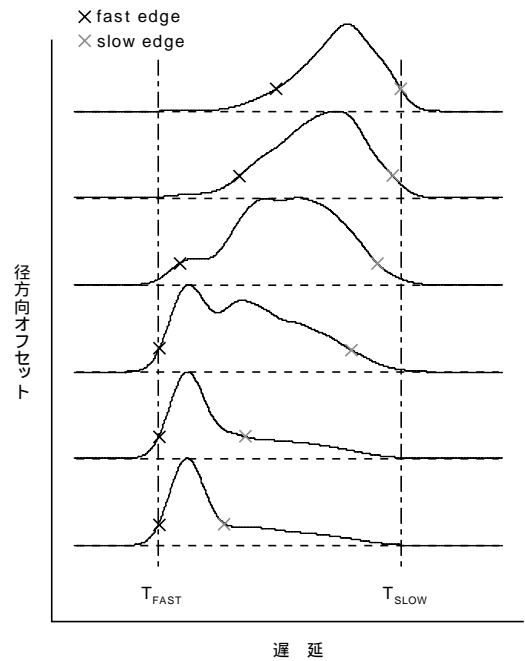


図1 DMD測定概念図
Conceptual DMD waveform

表2 DMDマスクテンプレート
DMD mask templates

テンプレート 番号	Inner mask DMD (ps/m)		Outer mask DMD (ps/m)	
	$R_{INNER}=5 \mu m$	$R_{OUTER}=18 \mu m$	$R_{INNER}=0 \mu m$	$R_{OUTER}=23 \mu m$
1	0.23	0.70		
2	0.24	0.60		
3	0.25	0.50		
4	0.26	0.40		
5	0.27	0.35		
6	0.33	0.33		

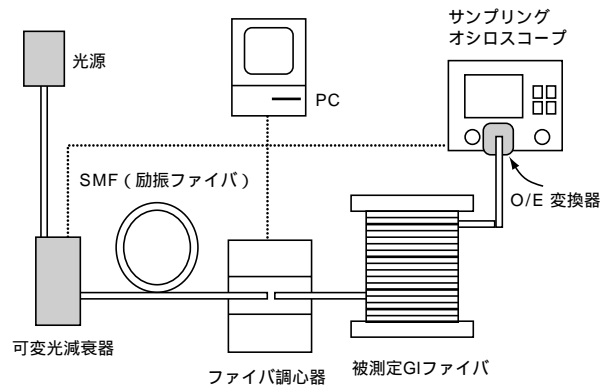


図2 DMD測定装置
Set-up for DMD measurement

aでもDMD値が0.41ps/mとなり、10Gb/s伝送用ファイバとしては不合格となる。このようにわずかな屈折率変動でもDMDに影響を与えるため、新型MMFに対してはDMD測定が不可欠となる。

3. ファイバ設計

DMD特性はファイバの屈折率分布と密接に関係してお

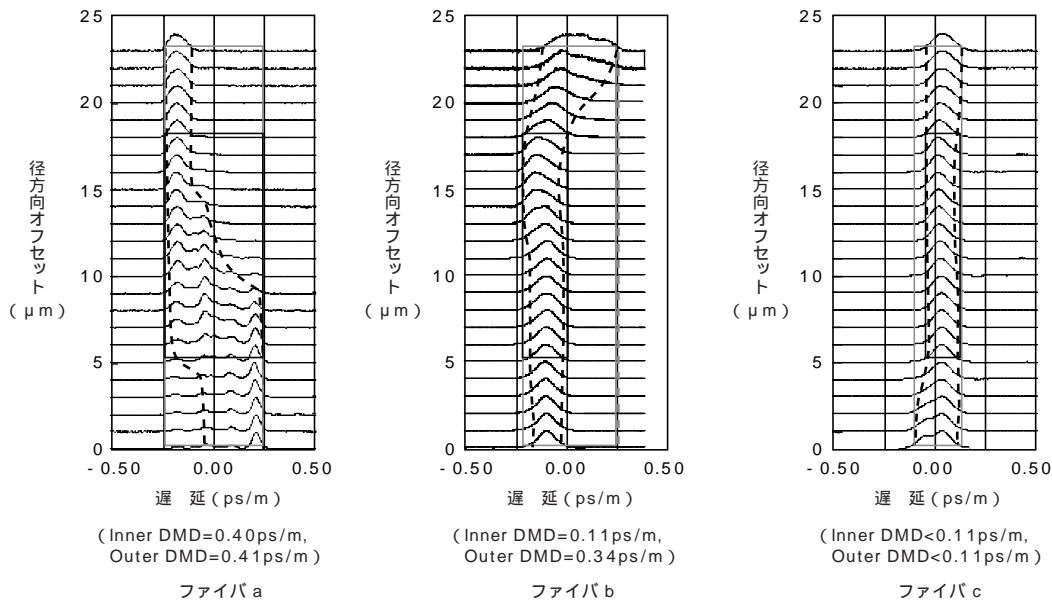


図 3 DMDの測定結果
Measured DMDs

り，中心ディップやリップルの存在などわずかな屈折率の変動でも悪化してしまう．10Gb/s伝送用MMFを作製するためには，今まで以上に厳密に光ファイバ母材の屈折率分布を制御する必要がある．そのため，われわれは屈折率分布から数百ある伝搬モードの遅延を正確に計算し，さらに光源の情報，励振ビーム径，オフセット量等測定系を反映した情報を取り込み，モードごとに異なる励振パワーおよび伝送損失を考慮したDMDシミュレータを開発し，ファイバの設計および母材の検査に用いた．

各モードの伝搬定数は弱導波近似下の横方向電磁界関数Rが満たす波動方程式

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r \frac{dR(r)}{dr} \right] + \left[k^2 n^2(r) - \beta^2 - \frac{m^2}{r^2} \right] R(r) = 0$$

を解くことにより得られる．ここに， $k = \omega/c$ ， c は光速である．また， n ， β ， m はそれぞれ屈折率，伝搬定数，方位方向モード次数を表す．この方程式を有限要素法で解くことにより，ファイバの屈折率分布から固有モードの伝搬定数 β_{mn} を求めることができる³⁾．また，励振された各モードはさまざまな要因でそれぞれ異なる伝搬損失をもつが，ここでは，モードごとの伝搬損失を次のように近似する⁵⁾．

$$P_{mn} = \exp(-a \cdot K_{mn}^b)$$

ただし， a ， b はフィッティング定数であり， K_{mn} は下記に示す規格化伝搬定数である．

$$K_{mn}^2 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\beta_{mn}^2}{k^2 n_{core}^2} \right)$$

ここに， β_{mn} はLP_{mn}モードの伝搬定数， n_{core} は最大比屈折率差を表す．

DMDをシミュレーションするため，オフセット励振を

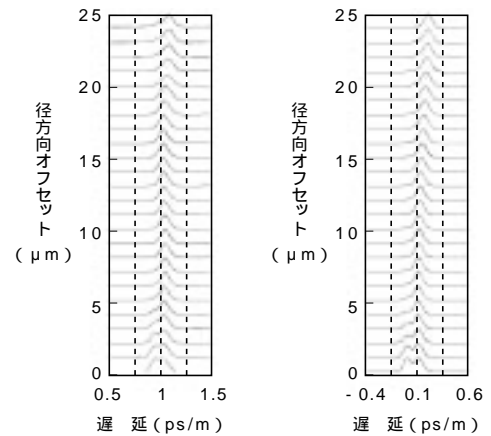


図 4 DMDの比較：左)測定値，右)計算値
DMD comparison: left) measurement, right) simulation

正確に計算に取り入れる必要がある．ここでは，入射光による被測定ファイバLP_{mn}モードのパワー結合効率を

$$\eta_{mn} = \frac{\left| \int R_1 R_{mn} dx dy \right|^2}{\left| R_1 \right|^2 dx dy \left| R_{mn} \right|^2 dx dy}$$

で与える．ただし， R_1 はオフセットを考慮に入れた入射光の電界分布， R_{mn} はLP_{mn}モードの横方向電磁界関数を表す．

以上の理論モデルにより，DMD測定をシミュレーションすることができる．図4は母材の屈折率分布から計算したDMD波形と得られたファイバを測定したDMD波形を比較した一例であり，両者は良く一致していることがわかる．

4. ファイバ特性および伝送実験の結果

表3にFutureGuide[®]-MM10Gの主要仕様を示す．さらに，

表3 FutureGuide®-MM10Gファイバの光学特性
Typical characteristics of FutureGuide®-MM10G

項目	FutureGuide®-MM10G	
	リンク長(300m)	リンク長(150m)
コア径(μm)	50 ± 3	
クラッド径(μm)	125 ± 2	
偏心率(μm)	3以下	
クラッド非円率(%)	2以下	
伝送損失(dB/km) @ 0.85 μm @ 1.3 μm	2.5以下 0.8以下	
NA(開口数)	0.200 ± 0.015	
零分散波長(nm)	1,295 ~ 1,320	
全モード励振帯域(MHz·km) @ 0.85 μm @ 1.3 μm	1,500以上 500以上	700以上 500以上
等価帯域(MHz·km) @ 0.85 μm	2,000以上 950以上	
スクリーニングレベル(%)	1以上	

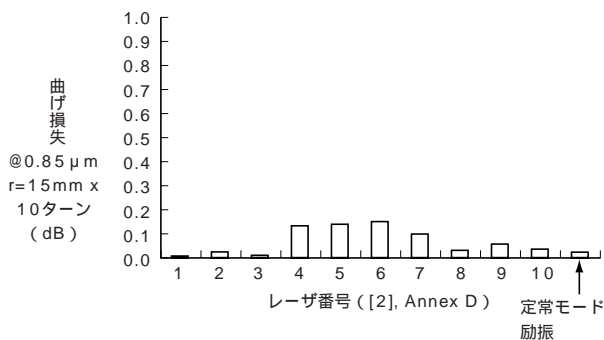


図5 各励振時の曲げ損失
Bend loss for various excitations

適切なDMD規格を設定することにより10Gb/s光信号の550m伝送も可能である。最近、宅内配線向けに曲げ損失を低減したシングルモード光ファイバが開発されており⁶⁾、ビル内やフロアでの引き回しを考えると、MMFにおいても曲げ損失は重要なパラメータとなる。MMFの曲げ損失としては、LED光源などを想定し、定常モード励振下での測定が規定されている⁷⁾。定常モード励振下での曲げ損失は、0.85 μm、1.3 μmのいずれの波長帯においても半径15mm10ターンで0.5dB以下であり、本ファイバはFutureGuide®-SR15⁸⁾と同等の曲げ特性を示す。

一方、0.85 μm波長帯の10Gb/s等の高速伝送時に用いられるVCSEL光源のパワー分布は一定ではない。IECにおけるDMD測定方法には、DMD測定結果から実効帯域を計算するために、典型的な10個の光源のパワー分布が記されている。DMDの測定波形とこの光源のパワー分布を用いて、VCSEL励振時に曲げ損失の評価を行った結果を図5に示す⁹⁾。光源のパワー分布により曲げ損失の値は大きく変化するが、10ターンで0.5dB以下となる。したがって、適切なレベルのブルーテストを行うことにより、許容曲げ半径15mmのMMFを実現することが可能である。

最後に、作製したMMFを評価するために、DMD値および条長の異なるMMFについて10Gb/sの伝送実験を行った。図6にそのパワーペナルティとDMD・リンク長積との相関を示す。パワーペナルティは、分散に起因する信

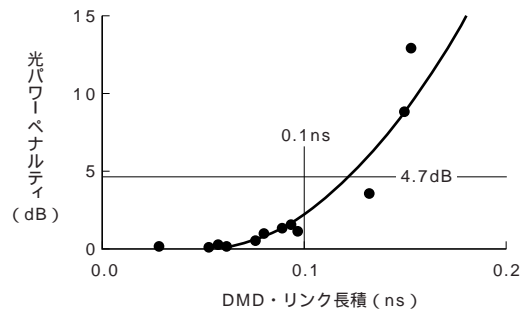


図6 伝送実験の結果
Result of transmission experiment

号間干渉によって劣化した伝送特性を補うのに必要なパワーとして測定され、伝送特性劣化量を表すパラメータである。IEEE802.3aeで規定されるリンクパワーバジェット7.3dB から伝送損失および接続損失2.6dB を差引くと、パワーペナルティの許容上限は4.7dB となる。一方DMDの上限規格は0.333ps/m (1/(10Gb/s × 300m)) であり、300m 伝送の場合DMD・リンク長積の上限は0.1ns となる。図6に示すように、DMD 測定で規格を満たしているファイバはすべて伝送規格をも満たしている。これにより、作製した10Gb/s伝送用MMFは確かに10GbE 規格をクリアしていることを確認した。

5. む す び

われわれは製造に精密な屈折率分布が制御可能なPCVD法、設計に正確な理論モデルに基づくシミュレータ、測定に新しいDMD測定システムを使用し、10Gb/s伝送用のマルチモードファイバFutureGuide®-MM10Gを開発した。作製したファイバはIEEE802.3aeに準拠しており、10GBASE-SR/SWによる光伝送網の構築に適している。

参 考 文 献

- 1) IEEE Standard 802.3ae, June 2002
- 2) IEC 60793-2-10 Ed2.0
- 3) K. Okamoto: Comparison of calculated and measured impulse responses of optical fibers, Appl. Opt., (18), 13, 2199, 1979
- 4) P. Pepeljugoski, et al.: Development of system specification for Laser-optimized 50-μm multimode fiber for multigigabit short-wavelength LANs, J. Lightwave Technol., (21), 5, 1256, 2003
- 5) M.J. Yadlowsky, et al.: Distributed loss and mode coupling and their effect on time-dependent propagation in multimode fibers, Appl. Opt., (32), 33, 6664, 1993
- 6) 池田真拳ほか：接続損失低減型低曲げ損失光ファイバ, 信学技報, OCS2003-43, 35, 2003
- 7) IEC60693-1-47
- 8) <http://www.fujikura.co.jp/opticable/wa/sr15.html>
- 9) 竹永勝宏ほか：10Gb/s伝送用マルチモード光ファイバの曲げ損失特性, 信学会総合大会, B-13-10, 2004