

# テラビット光通信と光パルス

猿 渡 正 俊

## Terabit/s Optical Communications Using Ultrashort Pulses

Masatoshi SARUWATARI

To accommodate the coming multimedia era including picture services, novel high-speed photonic technologies that can supersede the conventional electron-based ones are urgently required for next-generation lightwave communications. In this review, focus is placed on optical time-division multiplexed (OTDM) transmission technologies that can fully utilize ultrafast and wideband characteristics of ultrashort optical pulses. The essential photonic technologies, including ultrafast optical pulse generation, all-optical multi/demultiplexing, optical timing extraction, and optical sampling techniques, are widely reviewed, and also their applications to large-capacity OTDM transmissions toward Tbit/s are briefly described together with state-of-the-art performances and future prospects.

**Key words:** ultrahigh-speed transmission, OTDM transmission, optical pulse generation, optical multiplexing, optical demultiplexing, optical timing extraction, optical sampling

光ファイバー通信システムは、開発に携わった研究者のたゆまぬ努力と光ファイバーや半導体レーザー等の素性のよさも加わって、わずか10数年の間に伝送容量の桁違いの増大が図られ、今日の通信ネットワークの経済化に大きく寄与してきた。例えば単一チャネル（単一波長）では、電気時間多重（ETDM）技術を使用して毎秒10 Gbit（電話換算で13万チャネル）の超高速システム（FA-10G方式）が1996年に実用化されており、現在は同じETDM技術をスピードアップして40 Gbit/sをベースとする装置技術が実用フェーズを迎えている。また、エルビウム添加光ファイバー増幅器（EDFA）の特長を生かして、波長分割多重（WDM）による大容量化も大きく進展し、日本では2.5 Gbit/sをベースに48波多重した120 Gbit/sシステムや、10 Gbit/sを44波多重した440 Gbit/sシステムも実用に供されている。しかしながら、インターネット等の急激な普及によるアクセス系のブロードバンド化に対処するにはペタビット領域の通信・処理技術が不可欠であり、それ

に向けた超高速・超大容量の光伝送技術の開発と、超高速・超高スループットの光信号処理技術の開拓が求められている。

研究レベルの現状を整理すると、単一チャネル（1波長）の超高速化の限界追求としては、超短光パルスを用いた全光処理による光時分割多重（OTDM）伝送が注目されている<sup>1)</sup>。OTDMでは、新たに開発された超短光パルス列発生技術と光処理技術（光時分割多重（光MUX）、光時分割分離（光DEMUX）、光クロック抽出、光サンプリング）が結集されており、これまで単一チャネルで100~400 Gbit/s<sup>2-5)</sup> および640 Gbit/s~1.28 Tbit/sの伝送実験<sup>6,7)</sup>が報告されている。また、100~200 Gbit/sのOTDM信号とWDM技術を組み合わせて、400 Gbit/s~3 Tbit/sの伝送実験<sup>8-11)</sup>も発表されている。一方、WDM伝送に関しては、20~40 Gbit/sをベース信号にして100波を超える稠密（dense）な波長分割多重（DWDM）伝送が活発に研究されている。現在、国内外の研究機関が伝送容量の記録を競っ

表1 超高速光パルスの発生技術の比較.

方法	繰り返し周波数 [制限要因]	$\Delta\tau$ (ps)	$\Delta\tau \cdot \Delta\nu$	コメント
利得スイッチ DFB-LD	任意 [RC定数制限]	~20 (6) (0.8)	>TL (~TL) (~TL)	赤色チャープ (チャープ補償:CC) (CC+ソリトン断熱圧縮)
CW+EA変調	任意 [変調器制限]	~15 (2.5)	~TL (~TL)	パルス幅大 (ソリトン断熱圧縮)
モード同期 (LD)	固定	~10 (<1)	>TL (~TL)	従来型 (CPM型またはEA変調器)
高調波モード同期 (EDFレーザー)	可変 [モードロッカー]	~3	TL	波長可変 ~20 nm
SC発生 (DDF)	可変 [励起周波数]	<1	~TL	波長可変 >200 nm

EA: electro-absorption (電界吸収型), TL: transform limited (フーリエ変換限界), SC: supercontinuum (スーパーコンティニューム), DDF: dispersion-decreasing fiber (分散減少ファイバー).

ており、5年間で1~2.6 Tbit/s<sup>12-14)</sup>から10 Tbit/s 伝送<sup>15)</sup>まで拡大されている。また、光処理技術に関しては、上記OTDMの端局処理用に加えて、光段で中継処理する全光中継器(光3R)が注目を集めている。これは、EDFAによる1R中継では回復できない劣化(波形歪み、ジッター累積、雑音増加)した光波形を電気処理なしに再生することをねらいとしており、電気処理の不可能な超高速光伝送では特に重要な機能となる。

本稿では、超高速信号処理や他分野への応用も期待できる超短パルスを使ったOTDM技術的を絞り、キーとなる各種の要素技術とテラビットを超える超高速光通信への応用について、最近の技術動向と今後の展望を述べる。

## 1. 各種要素技術とその役割

### 1.1 超短パルス光源

超高速・長距離の光伝送を実現するには、信号光には超短パルス光源が必要であり、かつ、ファイバー伝搬による波形劣化を最小にするために余分なスペクトル広がりがないものが望まれる。この条件は、光パルスの時間幅とスペクトル幅がフーリエ変換の関係を満たす、いわゆるフーリエ変換限界(transform limited: TL)のコヒーレントな光パルスを意味している。また、繰り返し周波数 $f_0$ が直接変調のできる範囲内で高速であり、かつ網同期をとるためネットワーク側から送信された外部クロックに同期できることが望まれる。さらに、ファイバー伝送路のゼロ分散波長との整合やWDMへの適用も考慮すると、中心波長の制御性、可変性、安定性も必要な特性となる。特に、後述の光サンプリング等の光処理に使用する制御光に関しては、最小の時間幅(フェムト秒)と低ジッター特性がより強く求められる。

表1に、各種の超短光パルスの発生方法とその特徴を比

較した。利得スイッチ半導体レーザー(GS-LD)<sup>16)</sup>と連続光(CW)を電界吸収型(EA)変調器で切り取るCW+EA変調法<sup>17,18)</sup>は、繰り返し周波数がデバイスの応答速度(2~10 GHz)の範囲で連続可変であり同期が容易という特長がある。しかし、パルス幅が20~30 psと広いため100 Gbit/s以上の用途には不十分であり、線形チャープ補償(CC)やソリトン断熱圧縮(SAC)などの圧縮手段を追加する必要がある。

半導体レーザーのモード同期(ML-LD)<sup>19-23)</sup>は超高速のサブピコ秒パルス列を得る方法として有効である。特に、過飽和吸収層を共振器の中心に配置した衝突パルスモード同期(CPM-LD)構成<sup>19)</sup>では、能動/受動モード同期により繰り返し周波数が $f_0=40\text{ GHz}/350\text{ GHz}$ のピコ秒/サブピコ秒幅のパルス列が得られた。発表当時は40 GHzの外部変調は不可能であり、スペクトル幅もTL条件より広がっており、システム応用には使用されなかった。その後、長共振器構造(5~20 mm)による $f_0$ の低減<sup>20)</sup>、EA変調器や過飽和吸収層のモノリシック集積化による短パルス化<sup>21)</sup>、さらにはDBR構造の組み込みによるスペクトルの狭帯化などの対策により、ほぼTLのサブピコ秒の超高速パルス列が得られるようになった<sup>22,23)</sup>。詳細は本特集号の他の記事を参照されたいが、現在では超高速伝送実験にも広く応用されている。特に、ML-LDは小型化、低コスト化に有利であり、現在、160 Gbit/sのOTDM信号をねらいとした40 GHzのETDM信号源として、また、後述のスーパーコンティニューム(SC)発生の励起用光源としても注目されている。

エルビウムドープファイバー(EDF)レーザーの高調波モード同期(HML)法<sup>24-27)</sup>は、ほぼ完全なTLパルスを広い繰り返し周波数範囲(数MHz~20 GHz)で発生できる長所がある。本方法の課題は高安定動作であり、スーパ

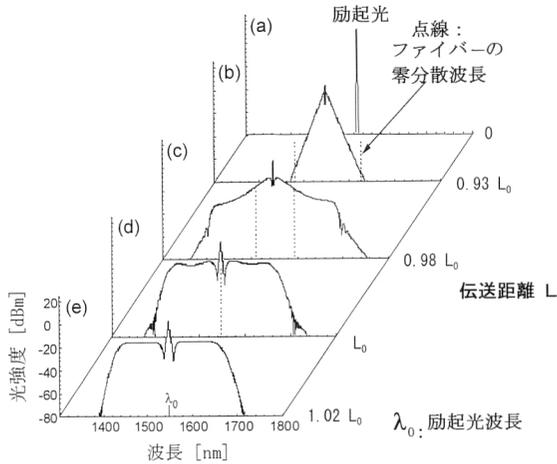


図1 短光パルスの光ファイバー伝搬によるスーパーコンティニューム (SC) 発生の様子。

一モード間の競合や共振器ゆらぎの対策が必要である。おもな方法として、エタロンの挿入<sup>25)</sup>、共振器長の揺動<sup>26)</sup>、共振器の偏波保持化 (単一偏波化)<sup>27-30)</sup> が検討され、単一偏波化の有効性が示された。さらに波長可変素子と光遅延回路を付加することで、20 GHz 程度の繰り返しでパルス幅 3.3 ps、波長可変幅 7 nm の動作が実現した。

光伝送システムでは半永久的な長時間の安定動作が必要であり、この観点から、共振器長を電氣的に制御するモード同期 EDF レーザーの安定化が検討された。ひとつは不安定なモード同期状態に移るときに発生する緩和振動に着目して、そのレベルが最小となるように光遅延回路を帰還制御する方法で、繰り返し周波数  $f_0$  の再調整をすることなく測定時間 (10 時間) にわたって符号誤り率 (BER) = 0 の安定動作が確認された<sup>29)</sup>。また最近、モード同期パルス列からクロックを抽出して変調器に帰還するという再生モード同期の構成を改良して、固定された周波数で安定動作する方式も報告された<sup>30)</sup>。モード同期 EDF レーザーは時間・帯域幅積がソリトン波形 ( $\text{sech}^2(t)$ ) の形状に対応する 0.33 であり、波長可変性も活用して 100 Gbit/s 以上の OTDM 関連実験に広く応用された。

SC 光は、自己位相変調、相互位相変調、四光波混合 (FWM) 等の三次非線形の複合効果を介して、物質を通過した励起光パルスのスペクトルが超広帯域に広がる現象である。異常分散領域で分散値が減少する低分散光ファイバーを HML-EDF レーザーパルスで強く励起することで、200 nm 以上にわたりスペクトルがフラットに広がる SC 光が得られた<sup>31,32)</sup>。図 1 に、励起パルスのファイバー伝搬によってスペクトルが広がっていく様子を示す。入力部ではソリトン断熱圧縮でパルスの狭窄化が生じるので、比較的弱い数ワット (ピーク値) の励起パルスで広スペクトル

幅の SC 光パルスが発生できる。SC 光パルスは、適当なスペクトル幅を切り出すことで、そのフーリエ変換で定まる時間幅を有するパルス列が得られる。これは SC パルスがほぼコヒーレントなスペクトル広がりをもつことを意味しており、任意の中心波長で励起パルス幅よりも狭い超短パルス列が得られる<sup>33)</sup>。最近、SC パルスのスペクトルは、励起用のモード同期レーザーと同様に、同じ縦モード間隔を有する多数の CW 光の集合であることがわかった。すなわち、SC 光源の縦モードを 1 本ずつ分離できれば、それぞれが縦モード周波数に相当する連続光キャリアとなる。これを利用して、1 つの SC 光源を用いて 1000 波を一括発生させて多波長光源としての有効性を実証した<sup>34)</sup>。また、励起光源の波長を周波数グリッドに合わせて、SC 光で発生させたすべての多波長キャリアを周波数基準値に一致させることも示された。以上のように、SC 光源はサブピコ秒のパルス光源、OTDM/WDM 用の多波長パルス光源、DWDM 用の多波長 CW 光源など、通信から計測分野まで広範な応用が期待できる。

## 1.2 全光 MUX 技術

OTDM 伝送方式では、光パルス信号を時分割的に多重/分離する光 MUX/光 DEMUX が不可欠である。ETDM の動作速度が 40 Gbit/s に達しているので、少なくとも 160 Gbit/s 以上が目標値である。光 MUX は、当初、実験・評価用として平面光導波路 (PLC) 回路を使用した 2 種類の光 MUX 回路が製作された。これらは 1 チャネルの変調パルス列をチャネル数だけ分岐して時間的に重ならないように多重するものであり、疑似的に超高速光信号が発生できる。2 分岐多重を繰り返すタイプは 2<sup>n</sup> 倍 ( $n$ ; 段数) の多重化信号しか発生できないが、多モード干渉型カップラーを使用したタイプは任意の整数が選べる。これらは、数百 Gbit/s の光伝送/処理実験に用いられた。

実際のシステムでは低次群のすべてのチャネルを時分割多重する必要がある。多重化されたパルス列の間隔 (位相) を揃えるには従来の ETDM と同様にリタイミングが必要であるが、多重化速度と等しいクロック光パルス列を低次群の光信号で全光的に変調するのが有効である。その一環として、光半導体増幅器 (SOA) 中の四光波混合 (FWM) による波長変換を利用して、100 GHz のクロック光パルスを 2 チャネルの 10 Gbit/s 光信号で全光的に変調する 2 多重実験が報告された<sup>35)</sup>。また、繰り返し  $f_{cL}$  のクロック光パルス列から高分散ファイバーを通すだけで整数倍 (繰り返し  $f_{cL} \times n$ ) の多重化クロック光を発生させる簡易な手法が発表された<sup>36)</sup>。この手法を使って、10 GHz のモード同期パルスから 50~400 GHz (5~40 倍) のクロック光パルス

が得られることを示し、発生させた 100 GHz クロック光に 3 チャンネルの 10 Gbit/s 信号を非線形ループミラー (NOLM) による全光変調を使って多重化した<sup>37)</sup>。

最近、ポスト 40 Gbit/s をねらいとして、OTDM 方式を使用した 120~160 Gbit/s 多重化装置の試作検討が進められている。これまで、光ファイバー遅延線と EA 変調器を用いた OTDM プロトタイプ機が報告されている<sup>38,39)</sup>。また、疑似位相整合 LiNbO<sub>3</sub> (QPM-LN) による波長変換素子と各チャンネルの遅延長を精密に制御した PLC を用いて、多重化クロック光を 20 Gbit/s×8 ch の光信号で全光変調する容量 160 Gbit/s の OTDM-MUX モジュールも開発されている<sup>40)</sup>。

### 1.3 全光 DEMUX 技術

超高速の光パルス列を分離する光 DEMUX については、光ファイバーや半導体材料の光非線形を利用した種々の全光スイッチが研究されている<sup>41-69)</sup>。これに要求される条件は、①超高速でビット誤りなしの安定動作、②LD または EDF レーザーによる制御が可能な低光電力駆動、③

偏波無依存性、④多出力化 (一括分離) などである。表 2 に、これまで報告のなされた全光 DEMUX を分類し、それらの特性を比較した。以下には、これまでの進歩に注目して代表的な実験例を紹介する。

偏波無依存 (PI) 動作は、PANDAファイバーの主軸を直交接続した非線形ループミラー (NOLM) 型 DEMUX<sup>62)</sup>、ねじりファイバーループによる偏波面回転ミラーを使用した FWM 型 DEMUX<sup>44)</sup> に続いて、半導体レーザー増幅器 (SOA) の FWM を利用して 200 Gbit/s での PI 動作<sup>49)</sup> が報告された。高速化については、光ファイバーの四光波混合 (FWM) を使用して 500 Gbit/s での DEMUX 実験が 1995 年に発表され<sup>46)</sup>、その 3 年後に NOLM を使用した 640 Gbit/s DEMUX 実験が報告された<sup>64)</sup>。これらの記録は、その後活発化した SOA 等の DEMUX 実験でもまだ破られていない。

一括分離の光 DEMUX 実験は、光ファイバー中の FWM を利用した 100 Gbit/s 信号からの 4 チャンネル分離<sup>45)</sup>、NOLM による時間スイッチを利用した 5 チャンネル

表 2 全光型時分割分離回路 (全光 DEMUX)。

種類	ビットレート (Gbit/s)	誤り率測定	著者	年	文献			
光カースイッチ	2/60	—	Morioka (NTT), <i>et al.</i>	1987/92	41)			
	40	—	Patrick (BT), <i>et al.</i>	1993	42)			
FWM スイッチ	ファイバー	16	free	Andrekson (AT&T), <i>et al.</i>	1991	43)		
		100-PI	free	Morioka (NTT), <i>et al.</i>	1994	44)		
		100 (MO: 4 ch)	free	Morioka (NTT), <i>et al.</i>	1994	45)		
		500	free	Morioka (NTT), <i>et al.</i>	1996	46)		
	SOA	20	free	Ludwig (HHI), <i>et al.</i>	1993	47)		
		100	free	Kawanishi (NTT), <i>et al.</i>	1994	48)		
		200-PI	—	Morioka (NTT), <i>et al.</i>	1996	49)		
		160 (MO: 全 8 ch)	free	Shake (NTT), <i>et al.</i>	2002	50)		
		XPM スイッチ	ファイバー	60	—	Morioka (NTT), <i>et al.</i>	1992	51)
				40	—	Patrick (BT), <i>et al.</i>	1993	52)
100 (MO: 6 ch)	free		Uchiyama (NTT), <i>et al.</i>	1998	53)			
100 (MO: 全 10 ch)	free		Uchiyama (NTT)	2001	54)			
SOA (DPM)	336	—	Nakamura (NEC), <i>et al.</i>	2002	55)			
ループミラー	NOLM	1	—	Blow (BT), <i>et al.</i>	1990	56)		
		5	—	Jinno (NTT), <i>et al.</i>	1990	57)		
		40	—	Takada (NTT), <i>et al.</i>	1991	58)		
		64	free	Andrekson (AT&T), <i>et al.</i>	1992	59)		
		40	free	Patrick (BT), <i>et al.</i>	1993	60)		
		20-PI	—	Bülow (Alcatel SEL), <i>et al.</i>	1993	61)		
		32/100-PI	free	Uchiyama (NTT), <i>et al.</i>	1993/94	62)		
		100 (MO: 5 ch)	free	Uchiyama (NTT), <i>et al.</i>	1996	63)		
		640	free	Yamamoto (NTT), <i>et al.</i>	1998	64)		
		SLALOM	9	—	Eiselt (HHI), <i>et al.</i>	1993	65)	
			80	free	Diez (HHI), <i>et al.</i>	1998	66)	
		TOAD	50/250	—	Sokoloff (Princeton Univ.), <i>et al.</i>	1993/94	67)	
			40	free	Ellis (BT), <i>et al.</i>	1993	68)	
			160	free	Suzuki (NTT), <i>et al.</i>	1994	69)	

SOA: 半導体レーザー増幅器, FWM: 四光波混合, XPM: 相互位相変調, NOLM: 非線形ループミラー, PI: 偏波無依存動作, free: エラーフリー動作, MO: 一括多出力動作, ch: 出力チャンネル数。

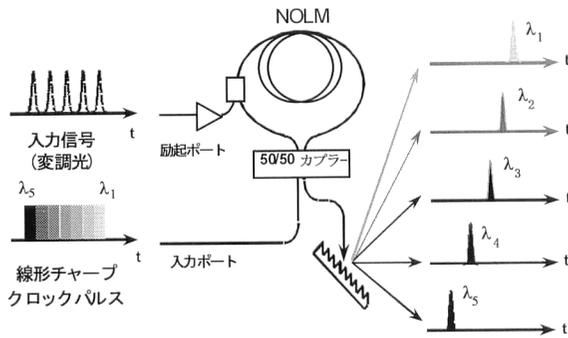


図2 線形チャープパルスを利用した NOLM 型スイッチによる OTDM → WDM 一括変換の原理。

分離<sup>63)</sup>が報告された。これらの基本は、線形チャープパルスを利用した OTDM から WDM への一括変換である。図2に原理図を示す。SC から生成した矩形の線形チャープパルスは多重化信号パルスのもとのクロックに同期しており、信号パルスの時間的な位置（チャンネル番号）に依存して異なる波長が切り出される。したがって、OTDM 信号が WDM 信号に変換されて光分波器で一括分離される。また、別のアプローチとして、信号光による相互位相変調 (XPM) を利用した単純でユニークな一括分離 DEMUX が考案された。これもチャープパルスを使用しており、100 Gbit/s 信号の6チャンネル分離に続き、全チャンネル (10 ch) の一括分離が実現した。原理の詳細は文献<sup>53)</sup>を参照されたい。

最近、小型集積化、低励起パワーの点で有利な SOA を利用した光 DEMUX が注目されている。SOA はキャリア密度を介して利得（屈折率）が変化するので、高速応答を実現するには回復時のキャリア寿命制限を回避する構成が必要である（FWM の場合は、励起光と信号光との波長差を大きくすれば高速化できるが効率が犠牲になる）。TOAD または SLALOM と称する構成は、SOA の遅いキャリア回復を補償するため、NOLM のサニャック干渉計型スイッチを变形したもので、スイッチ時間幅はループ中心からの SOA の位置ずれで定まる。これは SOA で生じた位相変化を2つのプローブ光で時間的にずらして干渉させるため、位相変化の差分のみが利用でき、高速化が図れる。現在、この原理を SOA 集積化型に応用した差分位相変調 (DPM) 型 DEMUX が盛んに研究されている。例えば、ハイブリッド集積型の対称マッハ・ツェンダー型全光スイッチを使用して、336 Gbit/s の DEMUX 実験が報告された<sup>55)</sup>。また、SOA、ループ導波路、3 dB カップラーなどすべての光回路素子を1つの基板に集積化した SIPAS と称するループミラー (TOAD) 型光スイッチを使って、完成度の高い高速の波長変換実験<sup>70)</sup>も発表されている。こ

のほか、SOA をベースにした超 100 Gbit/s 級の全光 DEMUX 実験が国内外の機関から報告されている。

光 DEMUX の他の動向を紹介すると、超高速で出力電圧の大きな UTC-PD と進行波電極構造で高速化を図った EA 変調器とをモノリシックに集積化した光トリガー型の光ゲートを用いて、320 Gbit/s の DEMUX 実験<sup>71)</sup>が報告された。これは O/E 変換型の可能性を示した点で興味深い。また、QPM-LN を高効率の波長変換素子に使用した 320 Gbit/s の DEMUX 実験<sup>72)</sup>や、フォトニック結晶ファイバーや小コアファイバーなどの高非線形ファイバーを使用した DEMUX 実験など<sup>73)</sup>、興味ある報告が盛りだくさんである。詳細は文献を参照されたい。

#### 1.4 光クロック抽出技術

光クロック抽出技術は受信側でのデジタル信号処理に不可欠な技術であり、超高速化には光-電気変換系等の帯域制限を受けない新規のクロック抽出技術が望まれる。特に、動作速度の目標を 100 GHz 以上とすると、抽出されたクロックの位相雑音は RMS ジッターで 1 ps 以下が要求される。また、受信端で使用されるので、偏波無依存で高感度特性（光受信レベルと同等）が要求される。

現状の光クロック抽出技術は、表3に示すように、①光タンク回路、②光注入同期法、③PLL（位相同期ループ）回路の3つに分類される<sup>74-99)</sup>。

光タンク回路はファブリー・ペロー・エタロンで光パルス信号の繰り返しに相当する光スペクトルを切り出す方法<sup>74)</sup>であるが、光領域で安定に抽出するのは難しく、電気信号に変換して狭帯域フィルターで処理するほうが容易で安定である。

光注入同期法は、自励発振型の半導体レーザー<sup>76-80)</sup>やモード同期レーザー<sup>81-88)</sup>に光パルス信号を注入することで、入力パルスに同期させた光パルス列を得る方法である。自励発振レーザーではその発振周波数に動作速度が依存するため、たかだか 18 GHz のクロック抽出しかできなかった<sup>78)</sup>。最近、2波長の分布帰還 (DFB) 領域を設けてビート周波数で自励発振する PhaseCOM と称するパルセーション LD を用いて、40 Gbit/s に続いて 80 Gbit/s から 80 GHz のクロック再生に成功した<sup>80)</sup>。一方、モード同期レーザーへの注入同期では、ML-LD では 10 Gbit/s 動作<sup>83)</sup>、ML-EDF レーザーでは 40 Gbit/s 動作<sup>87)</sup>が最高速の報告であった。最近、ML-LD への注入同期でもサブハーモニックの引き込み動作が起こるとの報告があり、80 Gbit/s の入射信号により 10 GHz でのモード同期動作<sup>84)</sup>、160 Gbit/s の入射信号により 40 GHz の再生モード同期動作（クロック再生）<sup>85)</sup>が報告された。これらの方法は光のまま（電気

表3 超高速光クロック抽出技術.

	原理	速度 (Gbit/s)	著者	年	文献	
光タンク回路	ファブリー・ペロー・エタロン	2	Jinno (NTT), <i>et al.</i>	1992	(74)	
	ファイバーのブリュアン利得	5	Miyamoto (NTT), <i>et al.</i>	1993	(75)	
注入同期	自励発振 DFB-LD	0.2	Jinno (NTT), <i>et al.</i>	1988	(76)	
		5	Barnsley (BT), <i>et al.</i>	1991	(77)	
		18	Ehrhardt (HHI), <i>et al.</i>	1993	(78)	
		10	Sartorius (HHI), <i>et al.</i>	1997/98	(79)	
	自励発振 PhaseCOM laser モード同期 LD	80	Bornholdt (HHI), <i>et al.</i>	2002	(80)	
		10	Takayama (NTT), <i>et al.</i>	1990	(81)	
		5	Ono (NTT), <i>et al.</i>	1994	(82)	
		10	Ono (NEC), <i>et al.</i>	1995	(83)	
		80	Miyazaki (CRL), <i>et al.</i>	2002	(84)	
		160	Ohno (NTT), <i>et al.</i>	2002	(85)	
	モード同期ファイバーレーザー	1	Smith (BT), <i>et al.</i>	1992	(86)	
		40	Ellis (BT), <i>et al.</i>	1993	(87)	
		20	Patrick (BT), <i>et al.</i>	1994	(88)	
位相同期ループ (PLL)	電気 PLL	40	Ellis (BT), <i>et al.</i>	1993	(89)	
		LiNbO <sub>3</sub> 変調器	14	Takayama (NTT), <i>et al.</i>	1992	(90)
		利得変調 (SOA)	1	Kawanishi (NTT), <i>et al.</i>	1988	(91)
	FWM (SOA)	50	Kawanishi (NTT), <i>et al.</i>	1993	(92)	
		50	Kamatani (NTT), <i>et al.</i>	1994	(93)	
		100	Kawanishi (NTT), <i>et al.</i>	1994	(94)	
	XPM (SOA in SLALOM)	200/400	Kamatani (NTT), <i>et al.</i>	1994/95	(95)	
		160	Yamamoto (HHI), <i>et al.</i>	2002	(96)	
		EA modulator	160	Boerner (HHI), <i>et al.</i>	2003	(97)
		カスケード SHG (PPLN)	160	Ohara (NTT), <i>et al.</i>	2003	(98)
FWM (ファイバー)	20	Saito (NEC), <i>et al.</i>	1994	(99)		

SOA: 半導体レーザー増幅器, FWM: 四光波混合.

系なしに) 分周光クロックが取り出せる特徴があり, 今後の研究の進展が待たれる.

PLL 回路は繰り返し信号の位相まで同期させることができ, 実用の面で有望な方法である. 問題は動作速度であり, それは信号光とクロック光との相関検出部の速度に依存する. これまで, 半導体レーザー増幅器 (SOA) を光相関検出器として使用して, きわめて超高速の PLL 動作が実現している<sup>90-95)</sup>. 初期の構成では, SOA の利得が光クロックの注入で飽和する相互利得変調 (XGM) による全光変調を利用しており, 50 GHz までのクロック抽出動作<sup>92)</sup> が確認された. その後, SOA の四光波混合 (FWM) 発生的高速応答を利用することで, 100 GHz で相互相関信号を検出した PLL 実験に成功した<sup>95)</sup>. 本回路は直接 16 分の 1 の分周クロック (6.3 GHz) が再生されるプリスケール型であり, ローカル光クロックを入射信号パルスと同程度以下の短パルスにすることで, 低い繰り返し周波数でも高速信号パルス列との相互相関がとれ, 位相誤差を検出することができる. FWM の応答はキャリアを介する相互利得変調より高速であり, RMS ジッターも 0.3 ps 以下が得られた. 動作速度は 400 Gbit/s まで確認され<sup>9)</sup>, OTDM による 400 Gbit/s 伝送実験に使用された.

最近, 次の実用化の目標である 160 Gbit/s の OTDM シ

ステムに供するため, 160 Gbit/s でのクロック抽出技術が盛んに研究されるようになった. 以下の例はすべて PLL 構成を使用しており, 違いは相互相関の検出方法だけであるが, いずれも 160 Gbit/s でのクロック再生に成功している. それらは, SOA をループ中心からずらして配置した SLALOM (TOAD) による相関検出法<sup>96)</sup>, EA 変調器に両方向から入射させて透過波形の差分をとる相関検出法<sup>97)</sup>, QPM-LN のカスケード SHG (二次高調波発生) を用いた相関検出法<sup>98)</sup> 等である. 光クロック抽出は超高速伝送方式の基本技術であり, 今後の進展が期待される.

### 1.5 光サンプリング技術

100 Gbit/s を超える超高速光伝送方式を実現するには, 伝送系全体や構成要素の時間応答特性をサブピコ秒の分解能で評価する必要がある. ここでは, 研究が活発化している光サンプリング技術について最近の進展を紹介する.

光サンプリングでは, 被測定信号光パルスと十分短い光サンプリング (ゲート) パルスとの強度相互相関を, 超高速の光非線形現象を利用して検出する. 非線形現象としては, 二次, 三次のいずれでも可能であるが, 高効率性と超高速性が要求される. また, サンプリングパルス光源には, サンプリング周波数 (一般に低繰り返し) との同期が可能な低ジッターの超短パルス光源が必要となる. 前述の

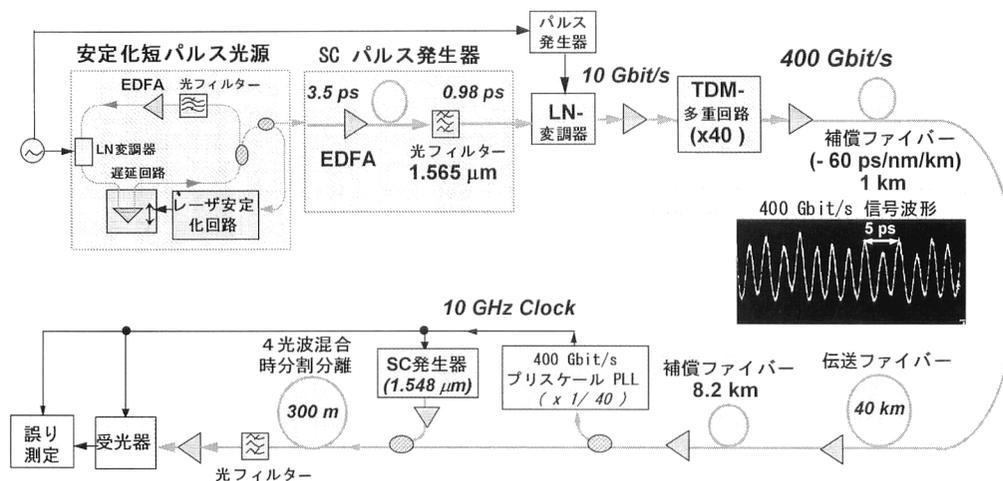


図3 SCパルス光源，全光MUX/DEMUXおよびプリスケール光PLLを用いた単一偏波400 Gbit/s-OTDM伝送実験系。

SC光源は、この要求に適する光源のひとつである。ここで、信号光とサンプリング光の繰り返し周波数をそれぞれ  $f_0$  と  $f_0/n - \Delta f$  のように等価的にわずかに違えると、信号光上のサンプリング点がゆっくりと掃引されるので、低速の受光系を用いてもその波形を再現することができる<sup>100)</sup>。

これまで、SCパルスとKTP (KTiOPO<sub>4</sub>) 結晶の和周波光発生 (SFG) を使用することで、100~400 Gbit/s の固定パターン (時間平均波形) が観測され、その有効性は示されていた<sup>101)</sup>。その後、高出力EDFAと高効率な二次有機結晶 (AANP) を使用することで S/N 比が大幅に改善され、1996年に100 Gbit/sクラスで初めてアイパターン観測が実現した<sup>102)</sup>。これを契機に、種々の機関で光サンプリングの開発研究が本格化した。

最近のアイパターン観測例を挙げると、高非線形ファイバーのNOLMをゲートに使用した例 (160 Gbit/s)<sup>103)</sup>、PLLで外部クロックと同期させた受動モード同期ファイバーレーザーとKTPを用いた例 (320 Gbit/s)<sup>104)</sup>、高非線形光ファイバー (50 m長) のFWMを用いた例 (300 Gbit/s)<sup>105)</sup>、利得透明SOAのSLALOMをゲートに用いた例 (320 Gbit/s)<sup>106)</sup> が報告されている。また、光DEMUX実験と同様に、QPM-LNのバルク型<sup>107)</sup> または導波路型結晶<sup>108)</sup> を用いた例、SOAのFWMを使用した160 Gbit/sサンプリング<sup>109)</sup>、さらには、光非線形以外にもSi-APDの二光子吸収<sup>110)</sup>、O/E光ゲート、コヒーレント検出による方法など、ここでは紹介しきれなかった多くの報告がある。

最近の新たな動向として、光サンプリング技術を光伝送信号の品質監視へ適用する検討も進められている<sup>111),112)</sup>。将来、さまざまな光信号系列が混在するトランスパレントなフォトニックネットワークでは、信号品質 (Q値) の

監視法として非同期サンプリングが適すると考えられ、100 Gbit/s級の光信号の品質評価実験が行われた。

## 2. 超高速光伝送技術

1993年秋、エルビウムドープファイバーレーザー、PLC-MUX、NOLM-DEMUX、SOA 相関検出型PLLを結集させて、世界初の100 Gbit/s光TDM信号の40 km伝送実験が報告された<sup>2)</sup>。その後、SC光源やFWMを利用したより高速で安定なDEMUXとPLLが開発され、長距離化・高速化の研究が進展した。長距離化では、エルビウムドープファイバー増幅器 (EDFA) による1R多中継を使用して、11中継による100 Gbit/s-500 km伝送<sup>3)</sup>、中継間隔を倍 (80 km) にした6中継による100 Gbit/s-560 km伝送が報告された。また高速化では、SCパルスからピコ秒パルスを切り出して、10 Gbit/sのOTDMによる200 Gbit/s-100 km伝送<sup>4)</sup>、そして400 Gbit/s-40 km伝送<sup>5)</sup>に成功した。

図3に400 Gbit/s伝送実験の構成を示す。信号パルスは、安定化EDFレーザーによる励起で発生させたSCを用いて1 ps幅の10 Gbit/sパルスを生成した後、PLC型光TDM多重回路で40多重して400 Gbit/s信号を生成する。ファイバー伝送路は、三次分散 (分散スロープ) とパルス伝搬中のSPM (自己位相変調) による波形歪みを避けるため通常のSMFを40 km伝送路に使用し、入口に正常分散付与ファイバー、出口に分散スロープ補償用ファイバーを配置した。これにより、伝送路全体は三次分散 (分散スロープ) まで補償され、またファイバー中をピーク値の抑圧されたプリチャープパルスが伝搬するので、SPMの影響も回避される。なお、分散量の最適調整は、光サンプリングにより波形を直接モニター (図中の波形参照) して行

った。また、PLL および光 DEMUX とともに 400 Gbit/s で動作するよう改善を図った。以上の系を用いて、光 TDM による 400 Gbit/s の 40 km 伝送実験に成功した。

400 Gbit/s 伝送実験の 4 年後、OTDM 伝送で最高速となる 1.28 Tbit/s-70 km の伝送実験が報告された<sup>7)</sup>。これは、10 Gbit/s のベース信号を PLC-MUX と NOLM-DEMUX を用いて 64 多重した 640 Gbit/s 伝送実験<sup>6)</sup>に基づいており、この系に偏波による 2 多重を加えたものである。したがって、厳密には OTDM による 1.28 Tbit/s 伝送とはいえないが、パルス幅 380 fs の極短光パルスを 70 km 伝送させるため、特に信号発生部と高次分散補償に新たな工夫が施されている。送信用光源にはタイムスロット 780 fs に対してジッターが十分小さな (100 fs 程度) PLL 再生モード同期ファイバーレーザーを使用し、分散減少ファイバーを用いたソリトン断熱圧縮により 200 fs 以下にした後、NOLM によりパルス裾部のペデスタルを除去している。ファイバー伝送路の高次分散補償は、サブピコ秒のテラビット光信号を長距離伝送させるうえで重要となる課題である。ここでは、プリチャープパルスを位相変調する方式を採用して、DCF (分数補償ファイバー) および EDFA を含めた光伝送路全体に対して、三次、四次分散まで含めて分散の同時補償を実現した。これらの技術を使用して、単一波長での 1.28 Tbit/s-70 km 伝送に成功した。技術の詳細は文献<sup>7)</sup>を参照されたい。

### 3. 今後の展望

本稿では、超短光パルスの高速性・広帯域性を生かした全光処理による光時分割多重伝送、いわゆる OTDM 伝送に的を絞って、キーとなる各種の要素技術とテラビット光通信への適用例について、最近の技術動向も交えて紹介した。10 年前、初めて 100 Gbit/s 伝送が報告された当時と比べると、ここで紹介した要素技術 (パルス発生、時分割多重/分離、光タイミング抽出、光サンプリング) は、性能のみならず完成度も向上しており、新たな原理発見や材料開発も加わり、製品化コストを意識した開発研究へと発展しつつある。特に、電気多重 (ETDM) による 40 Gbit/s システムが実用フェーズに達した現在、OTDM 方式はポスト 40 Gbit/s 方式の有力な候補であり、多くの研究機関で 160 Gbit/s をターゲットにした研究開発や装置試作が行われている。また、ここでは誌面の都合で割愛したが、超高速の OTDM をベースにした光伝送方式で特に重要となる光領域での中継方式、いわゆる光 3R (2R) 中継器の研究も活発化している。今後のさらなる発展を期待したい。

### 文 献

- 1) M. Saruwatari: IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **6** (2000) 1363-1374.
- 2) S. Kawanishi, *et al.*: ECOC'93, ThP12.1 (1993).
- 3) S. Kawanishi, *et al.*: OFC'95, ThL2 (San Diego, 1995).
- 4) S. Kawanishi, *et al.*: Electron. Lett., **31** (1995) 816-817.
- 5) S. Kawanishi, *et al.*: Electron. Lett., **32** (1996) 916-918.
- 6) M. Nakazawa, *et al.*: Electron. Lett., **34** (1998) 907-908.
- 7) M. Nakazawa, *et al.*: ECOC2000, PDP2.6 (2000).
- 8) T. Morioka, *et al.*: Electron. Lett., **32** (1996) 468-470.
- 9) T. Morioka, *et al.*: Electron. Lett., **32** (1996) 906-907.
- 10) S. Kawanishi, *et al.*: OECC'97, PDP2-2 (1997).
- 11) S. Kawanishi, *et al.*: OFC'99, PD1 (1999).
- 12) H. Onaka, *et al.*: OFC'96, PD19 (1996).
- 13) A. H. Gnauck, *et al.*: OFC'96, PD20 (1996).
- 14) Y. Yano, *et al.*: ECOC'96, ThB3.1 (1996).
- 15) K. Fukuchi, *et al.*: OFC'01, PD24 (2001).
- 16) A. Takada, *et al.*: IEEE J. Lightwave Technol., **LT-5** (1987) 1525-1533.
- 17) M. Suzuki, *et al.*: CLEO'92, CPD 26 (1992).
- 18) K. Suzuki, *et al.*: Meeting of Optical Amplifiers and their Applications (OAA), OSA Tech. Digest Ser., **14** (1993) 314.
- 19) Y. K. Chen, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **58** (1991) 1253-1255.
- 20) P. B. Hansen, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **4** (1992) 215-217.
- 21) A. Takada, *et al.*: Electron. Lett., **30** (1994) 898-900.
- 22) S. Arahira, *et al.*: IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **2** (1996) 480.
- 23) K. Sato, *et al.*: Electron. Lett., **34** (1998) 790-792.
- 24) A. Takada and H. Miyazawa: Electron. Lett., **26** (1990) 216-217.
- 25) G. T. Harvey and L. F. Mollenauer: Opt. Lett., **18** (1993) 107-109.
- 26) X. Shan and D. M. Spirit: Electron. Lett., **29** (1993) 979-981.
- 27) H. Takara, *et al.*: OAA'93, TuD1 (July 1993).
- 28) H. Takara, *et al.*: Electron. Lett., **30** (1994) 1143-1144.
- 29) H. Takara, *et al.*: Electron. Lett., **31** (1995) 292-293.
- 30) E. Yoshida and M. Nakazawa: Electron. Lett., **34** (1998) 1753-1754.
- 31) K. Mori, *et al.*: OAA'93, MD11 (1993).
- 32) T. Morioka, *et al.*: Electron. Lett., **30** (1994) 790-791.
- 33) T. Morioka, *et al.*: Electron. Lett., **30** (1994) 1166-1168.
- 34) H. Takara, *et al.*: ECOC'2000, PDP3.1 (2000).
- 35) S. Kawanishi, *et al.*: Electron. Lett., **33** (1997) 976-977.
- 36) I. Shake, *et al.*: Electron. Lett., **34** (1998) 792-793.
- 37) H. Takara, *et al.*: Conf. Opt. Fiber Commun. (OFC'98), PD16 (1998).
- 38) S. Kawanishi, *et al.*: ECOC'98, Postdeadline paper (1998) p. 41.
- 39) H. Murai, *et al.*: ECOC'02, No. 2.1.4 (2002).
- 40) 山田 貴, 美野真司, 石井元速, 鬼頭 勤, 北川 毅, 大原拓也, 高良秀彦: 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会講演論文集, C-3-22 (2002).
- 41) T. Morioka, *et al.*: Electron. Lett., **28** (1992) 521-522.
- 42) D. M. Patrick and A. D. Ellis: Electron. Lett., **29** (1993) 227-229.
- 43) P. A. Andrekson, *et al.*: Electron. Lett., **27** (1991) 922-924.
- 44) T. Morioka, *et al.*: Electron. Lett., **30** (1994) 591-592.
- 45) T. Morioka, *et al.*: Electron. Lett., **30** (1994) 1959-1960.

- 46) T. Morioka, *et al.*: Electron. Lett., **32** (1996) 833-834.
- 47) R. Ludwig and G. Raybon: *ECOC'93*, **3** (1993) 57.
- 48) S. Kawanishi, *et al.*: Electron. Lett., **30** (1994) 981-982.
- 49) T. Morioka, *et al.*: Electron. Lett., **32** (1996) 840-842.
- 50) I. Shake, *et al.*: Electron. Lett., **38** (2002) 37-38.
- 51) T. Morioka, *et al.*: Electron. Lett., **28** (1992) 1070-1072.
- 52) D. M. Patrick and A. D. Ellis: Electron. Lett., **29** (1993) 227-229.
- 53) K. Uchiyama, *et al.*: Electron. Lett., **34** (1998) 575-577.
- 54) K. Uchiyama: *OFC2001*, ThH2 (2001).
- 55) S. Nakamura, *et al.*: *OFC'02*, PD papers FD3 (2002).
- 56) K. J. Blow, *et al.*: Electron. Lett., **26** (1990) 962-964.
- 57) M. Jinno and T. Matsumoto: IEEE Photonics Technol. Lett., **2** (1990) 349-351.
- 58) A. Takada, *et al.*: *OFC'91* (1991) p. 50.
- 59) P. A. Andrekson, *et al.*: *OFC'92*, PD papers (1992) p. 343.
- 60) D. M. Patrick, *et al.*: Electron. Lett., **29** (1993) 702-703.
- 61) H. Bülow and G. Veith: Electron. Lett., **29** (1993) 588-589.
- 62) K. Uchiyama, *et al.*: Electron. Lett., **30** (1994) 873-874.
- 63) K. Uchiyama, *et al.*: Electron. Lett., **32** (1996) 1981-1991.
- 64) T. Yamamoto, *et al.*: Electron. Lett., **34** (1998) 1013-1014.
- 65) M. Eiselt, *et al.*: Electron. Lett., **29** (1993) 1167-1168.
- 66) S. Diez, *et al.*: Electron. Lett., **34** (1998) 803-805.
- 67) J. P. Sokoloff, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **5** (1993) 787-790.
- 68) A. D. Ellis and D. M. Spirit: Electron. Lett., **29** (1993) 2115-2116.
- 69) K. Suzuki, *et al.*: Electron. Lett., **30** (1994) 1501-1503.
- 70) 柴田泰夫ほか: NTT R&D, **51** (2002) 706-712.
- 71) S. Kodama, *et al.*: *OFC2003*, ThX5 (2003).
- 72) K. Kikuchi, *et al.*: *ECOC2002*, No. 8.4.2 (2002).
- 73) J. Li, *et al.*: *OFC2003*, TuH6 (2003).
- 74) M. Jinno and T. Matsumoto: IEEE J. Quantum Electron., **28** (1992) 895-900.
- 75) Y. Miyamoto, *et al.*: *OAA'93* (1993) p. 194.
- 76) M. Jinno and T. Matsumoto: Electron. Lett., **24** (1988) 1426-1427.
- 77) P. E. Barnsley, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **4** (1992) 83-86.
- 78) D. J. As, *et al.*: Electron. Lett., **29** (1993) 141-142.
- 79) B. Sartorius, *et al.*: Electron. Lett., **34** (1998) 1664-1665.
- 80) C. Bornholdt, *et al.*: *OFC'02*, TuN6 (2002).
- 81) K. Takayama, *et al.*: *Photonic Switching II* (Springer, Berlin, 1990) pp. 374-377.
- 82) T. Ono, *et al.*: *OFC'94*, OSA Tech. Digest Ser., **4** (1994) 233.
- 83) 小野隆志ほか: 1995年電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-1157 (1995).
- 84) T. Miyazaki, *et al.*: *ECOC'02*, No. 2.1.6 (2002).
- 85) T. Ohno, *et al.*: *OFC'03*, FF2 (2003).
- 86) K. Smith and J. K. Lucek: Electron. Lett., **28** (1992) 1814-1816.
- 87) A. D. Ellis, *et al.*: Electron. Lett., **29** (1993) 1323-1324.
- 88) D. M. Patrick: Electron. Lett., **30** (1994) 43-44.
- 89) A. D. Ellis, *et al.*: Electron. Lett., **29** (1993) 990-992.
- 90) K. Takayama, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **4** (1992) 99-101.
- 91) S. Kawanishi and M. Saruwatari: Electron. Lett., **24** (1988) 1452-1453.
- 92) S. Kawanishi, *et al.*: *OAA'93*, PD papers PD5 (1993).
- 93) O. Kamatani, *et al.*: Electron. Lett., **30** (1994) 807-809.
- 94) S. Kawanishi, *et al.*: *OFC'94*, PD paper PD23 (1994).
- 95) O. Kamatani and S. Kawanishi: IEEE Photonics Technol. Lett., **8** (1996) 1094-1096.
- 96) T. Yamamoto, *et al.*: *OFC'02*, TuN5 (2002).
- 97) C. Boerner, *et al.*: *OFC2003*, FF3 (2003).
- 98) 大原拓也ほか: 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-10-101 (2003).
- 99) T. Saito, Y. Yano and N. Henmi: *OFC'94* (1994) p. 61.
- 100) 高良秀彦ほか: 電子情報通信学会論文誌 B-1, **J-75** (1992) 372-380.
- 101) H. Takara, *et al.*: Electron. Lett., **30** (1994) 1152-1153.
- 102) H. Takara, *et al.*: Electron. Lett., **32** (1996) 2256-2258.
- 103) C. Schmidt, *et al.*: *OFC2002*, ThU1 (2002).
- 104) N. Yamada, *et al.*: *OFC2002*, ThU3 (2002).
- 105) J. Li, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **13** (2001) 987-989.
- 106) C. Schmidt, *et al.*: *ECOC'02*, No. 2.1.3 (2002).
- 107) S. Nogiwa, *et al.*: *OFC2002*, ThU4 (2002).
- 108) S. Kawanishi, *et al.*: Electron. Lett., **37** (2001) 842.
- 109) S. Diez, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **11** (1999) 1402.
- 110) K. Kikuchi, *et al.*: Electron. Lett., **34** (1998) 1354.
- 111) I. Shake, *et al.*: Electron. Lett., **36** (2000) 1727.
- 112) M. Westlund, *et al.*: *OFC2002*, ThU2 (2002).

(2003年7月3日受理)