

# 40GHz光パルス光源

荒平 慎 小川 洋

インターネットの普及と映像系コンテンツなど情報容量の増大に伴い、光ファイバ通信ネットワークの大容量化への要求がますます高まっている。光ファイバ通信システムは、1981年の本格的な商用システム（F-32M/F-100M）の導入以降、1990年代半ばまでは、時分割多重（Time Division Multiplexing：TDM）方式の高速化が進められ、1995年には10ギガビット毎秒（Gbit/s）の幹線系システムが実用化されている。また、1990年代半ば以降は、主として波長分割多重（Wavelength Division Multiplexing：WDM）方式による大容量化が進展し、最近では1.28テラビット毎秒（Tbit/s）（10Gbit/s×128ch.）大容量WDMシステムが商用化されるに至っている。大容量化は今後もますます進むと予想され、研究段階では10.92Tbit/sのWDM伝送実験が報告されている<sup>1)</sup>。

近い将来、光ファイバ通信ネットワークで必要とされる情報容量は10Tbit/s～100Tbit/sを超えるものとなると予想される。一方で、WDMにおける波長多重数は、現状で既に百チャンネルを優に越えており、更なる波長多重数の増加は装置の大型化、コスト増加により限界に近づいている。そのため、将来の超10Tbit/s光通信システムの実現へ向けて、TDMのさらなる高速化が最近再び注目されるようになってきている。

TDMの高速化は、電子デバイス、並びに半導体レーザーやフォトダイオードなどのオプトエレクトロニクスデバイスの高速化による、電気領域の高速化（Electrical TDM：EDTM）と、光領域での高速化（Optical TDM：OTDM）による。OTDM技術は、電子デバイスの速度制限によらず、Tbit/sレベルへの高速化が可能であり、将来的に有望であるが、光—光スイッチなど、光電変換を介さない光領域での信号処理技術が必要とされ、未だ研究段階にある。一方、ETDMは、電子デバイス等の高速化により、40Gbit/s程度までの高速化が視野に入ってきている。

一方、40Gbit/s光伝送を実現するためのデータフォーマットとしては、様々のものがある。その中で、リター

ン・トゥ・ゼロ（Retrun to Zero：RZ）方式は、従来商用システムで用いられているノン・リターン・トゥ・ゼロ（Non Retrun to Zero：NRZ）方式に比べ、S/N比の点で優れ、また、光ファイバの非線形光学効果（光カー効果）を用いた光ソリトンによる長距離伝送や、OTDM技術による超高速化が可能であることなどから、近年、検討が進み、盛んな研究開発がなされている。

RZ方式を実現するためには、周波数チャープや時間ジッタ・強度ジッタの小さい高品質光パルス光源が必須となる。本稿では、周波数40GHzで動作する光パルス光源の開発動向について述べ、次に、我々のグループで開発している40GHz集積化モード同期半導体レーザーの特徴について報告する。

## 40GHz光パルス光源の開発動向

40Gbit/s光通信システムにおいては、光信号の伝送路である光ファイバの持つ群速度分散による信号波形の劣化が著しく、また、信号の時間間隔が25 ps程度と狭くなるため、低周波数チャープ、低時間ジッタなど、光信号源に要求される性能はより一層厳しくなる。40GHz光パルス光源としては、大別して次の2種類を中心に開発が進められている。ひとつは、連続光を光強度変調器で変調して光パルス化する外部変調法であり、他方はファイバーレーザーや半導体レーザーを用いたモード同期法である（図1）。表1にそれぞれの特徴を示す。

外部変調法、モード同期法、いずれの方法においても、システムクロックと同期した光パルス出力を得るため、外部からシステムクロックと同期した正弦波変調を加えて動作させる。

外部変調法においては、印加電圧（または電流）に対する光強度変調器の光出力特性が線形であると、光出力も正弦波となり、光パルスが得られない。従って、光出力特性が非線形である光強度変調器が必要とされる。

半導体電界吸収型（ElectroAbsorption：EA）変調器は、その点で有望である。EA変調器を用いた外部変調法では、周波数40GHzでパルス幅5ps～6psの、フーリエ

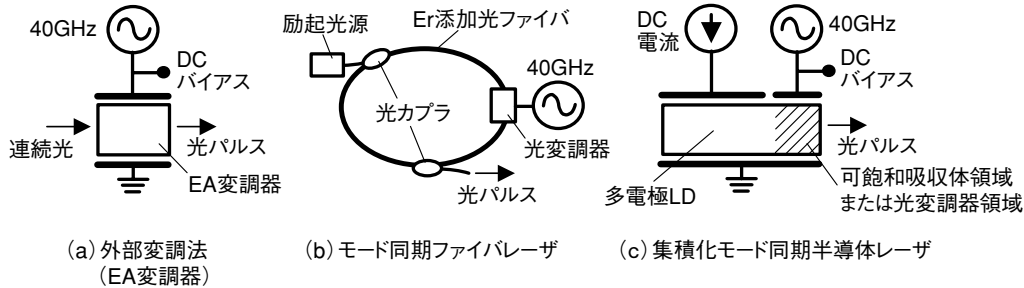


図1 40GHz光パルス光源の種類

表1 40GHz光パルス光源のパルス特性

		パルス幅	チャープング	時間ジッタ	光出力	On/Off比
外部変調法 (EA変調器)	単体	5 ps~	小	<0.2 ps	<1mW	15dB程度
	カスケード	3 ps~	小	<0.2 ps	<1mW	>30dB
モード同期法	ファイバー	2 ps~	極小	<0.2 ps	>10mW	>30dB
	半導体	2 ps~	小	<0.2 ps	数mW	>30dB

変換リミットに近い光パルス発生が可能である<sup>2)</sup>。EA変調器を用いた光パルス発生は、原理的に周波数可変であるためシステムクロックへの同期が容易で、かつ、波長可変（数nm程度）という利点がある。また、単体のEA変調器では、発生する光パルスのピーク強度と裾の強度の比（On/Off比と呼ぶ）が15dB程度と小さく、また、パルス幅がモード同期法に比べて広い点がネックとなる。この点は変調器をカスケード連結させた構造で改善が見られ、パルス幅3ps、On/Off比として30dB程度が報告されている<sup>3)</sup>。

EA変調器を用いた光パルス光源は、光出力が小さいため、送信端で既に光信号のS/N比が劣化することが問題点として挙げられる。それに対して、モード同期レーザーは、光出力・On/Off比の点で、EA変調器を用いた光パルス光源より優れており、低S/N比の高品質光信号の発生が期待できる。光通信で用いる波長帯（1.5  $\mu\text{m}$ 帯 / 1.3  $\mu\text{m}$ 帯）のモード同期レーザーとしては、エルビウム（Er<sup>3+</sup>）などを添加したファイバーレーザーを用いたもの、半導体レーザーをベースにしたものが主に開発されている。

ファイバーモード同期レーザー<sup>4) 5)</sup>は、光出力が大きいなど、一般的に半導体モード同期レーザーに比べて、優れた光パルス特性を有する。さらに、発振波長も数十nmの範囲に渡って連続的に可変できるといった利点を持つ。ファイバーモード同期レーザーは幾つかの会社で商品化されており、一般的な特性として、パルス幅2ps~程度、光出力>10mW、波長可変域1535-1565nmが得られている。一方、難点としては、光変調器、エルビウム添加光ファイバ、

励起用高出力半導体レーザーなど、複数の光学部品から構成され、大型・高価格であること、さらに後述するように、レーザー共振器のサイズが大きいため、動作不安定になり易く、動作安定性を得るためにさらに複雑な制御回路を必要とする点が挙げられる。

一方、半導体モード同期レーザーは、回折格子や結合レンズと外部共振器を形成したタイプ（外部共振器型）、単一の半導体基板上に作製した集積化光源の両タイプが開発されている。どちらのタイプを採用するかは、所望の周波数と強く関係する。後述するように、モード同期レーザーの光パルス周波数は、レーザー共振器長によってほぼ限定され、共振器長が短くなるほど、周波数は高くなる。InP系半導体レーザーの場合、周波数40GHzに相当する共振器長は約1.1mmとなる。この素子長は半導体レーザーとしてはごく一般的なもので、基本的なレーザー特性としても良好なものが得られるため、40GHzモード同期半導体レーザーとしては集積化光源の開発が中心となっている。以後、集積化光源タイプのモード同期半導体レーザーのことを集積化MLLD（monolithic Mode-Locked Laser Diode）と呼ぶ。

モード同期レーザー、特に集積化MLLDに固有の技術的課題として、光パルス周波数のシステムクロック（たとえば、SDH/Sonetにおける39.81312GHz）への同期が久しく問題視されている。それは、モード同期法では、原理的に、光パルス周波数（ $f_M$ ）は、次式で与える共振器周回周波数 $f_R$ の自然数倍に近い値に限定されるためである。

$$f_{ML} = Nf_r = N \frac{c}{2n_g L}$$

ここで、 $c$ は真空中の光速、 $L$ は共振器長、 $n_g$ は共振器内での平均群屈折率（InP系半導体レーザで3.5程度）、 $N$ は自然数である。 $N=1$ を基本モード同期と呼び、 $N>1$ を高調波モード同期と呼ぶ。

ファイバーモード同期レーザの場合、共振器長が数十m～数百mに及び、 $N$ が数千に達する高調波モード同期に相当する。 $f_r$ は数MHzから数十MHzであり、また、ファイバーループ内に適当な遅延線を簡単に挿入できるため、実質的に、周波数は連続的に変化できる。

一方、集積化MLLDはほとんどの場合、基本モード同期動作する。集積化MLLDにおいては、共振器長（ $L$ ）もしくは群屈折率（ $n_g$ ）は容易に変化できないので、周波数をシステムクロックに同調するためには、高精度な共振器形成、もしくはモード同期動作の同調周波数範囲を拡大する必要がある。

一般的なへき開プロセスによる、半導体レーザの共振器長誤差は、通常 $20\mu\text{m}$ 程度であることを考えると、同調周波数範囲としては約800MHz必要となる。同調周波数範囲の拡大は幾つか試みられている<sup>6) 7) 8) 9)</sup>。多電極MLLDの一部に電流や電圧を印加した方法や<sup>6) 8)</sup> チャージグレーティングを集積化するなど<sup>7)</sup>の方法で、数百MHz～1GHz程度の同調周波数範囲を得た例が報告されている。これらの方法では、周波数を変化させるとパルス幅や波長などが変化するという課題もある。一方、我々のグループでは最近、変調信号入力効率を改善した40GHz集積化MLLDモジュールの開発を進めた結果、システムクロックへの同期問題をほぼクリアできるようになっている<sup>9)</sup>。

集積化光源のメリットは、小型で大量生産が可能であり、また、動作安定性に優れているため、ファイバレーザに比べて、安価で高安定な、実用的光パルス光源を提供できることにある。40GHz集積化MLLDに関しては、Bell研での先行的な研究<sup>10)</sup>に始まり、現在、我々のグループも含めて日欧を中心に研究開発が進められている<sup>7) 8) 9) 10) 11) 12)</sup>。以後で、我々のグループで研究開発を進めている40GHz集積化MLLDのパルス特性について報告する。

### 40GHz 集積化MLLDのパルス特性

MLLDは、パルス発生メカニズムの違いから、2種類に大別される。一つは可飽和吸収体を用いた受動MLLDと呼ばれるもので、他方は光変調器を集積化した能動MLLDと呼ばれるものである（図1参照）。受動MLLD

は、可飽和吸収体の働きによって、外部から変調を与えなくとも光パルスが自発的に発生する。一方、能動MLLDは、光変調器領域に外部から変調を与えることによって、モード同期動作が生じて光パルスが発生する。

また、受動MLLDにおいても、実際にはシステムクロックへの同期と時間ジッタ低減のために、能動MLLDと同様に可飽和吸収体領域に外部変調を加えることが多い（ハイブリッドモード同期と呼ぶ<sup>11)</sup>）。

我々のグループでは両方のタイプの40GHz集積化MLLDの開発を行っている<sup>9) 11)</sup>。

受動MLLDのメリットは、パルス幅の下限値と周波数の上限値が、外部変調によって制限されないことにある。そのため、パルス幅1ps以下の極短光パルスの発生<sup>13)</sup>や、周波数1THz以上の超高周波数光パルスの発生<sup>14)</sup>に適している。

一方、能動MLLDの利点は、パルス幅を外部からの変調によってある程度制御できる点にある。すなわち、システム構成に対応して、パルス幅をある程度柔軟に変化できるため、システム設計上の自由度を高くできる。

図2に、我々が開発した集積化能動MLLDの素子構造を示す<sup>9)</sup>。素子は電極分割した多電極半導体レーザの構造をもち、光変調器として、先に述べたEA変調器を集積化している。レーザ発振に必要な利得領域は、バンドギャップ波長 $1.55\mu\text{m}$ 近傍の圧縮歪みを導入したInGaAsP/InGaAsP多重量子井戸構造を有する。また、EA変調器領域は、バンドギャップ波長 $1.46\mu\text{m}$ ～ $1.50\mu\text{m}$ の圧縮歪みInGaAsP/InGaAsP多重量子井戸構造、またはInGaAsPバルク構造を有する。

また、周波数可変特性と、発振波長制御のために、それぞれ受動導波路領域、分布ブラッグ反射鏡領域（Distributed Bragg Reflector：DBR）を設けている。それらの材料組成は、素子作製プロセスの簡略化のために、EA変調器と同じ組成としている。

各領域長は、典型的にはそれぞれ、EA変調器部：

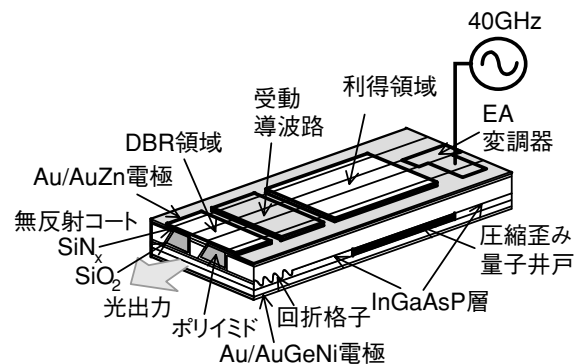


図2 40GHz集積化能動MLLDの素子構造

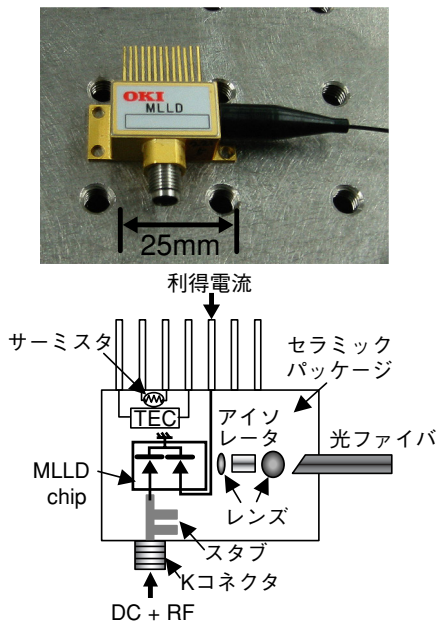


図3 集積化MLLDモジュールの外観図と内部構造

100  $\mu\text{m}$ , 利得領域: 610  $\mu\text{m}$ , 受動導波路領域: 110  $\mu\text{m}$ , DBR領域: 100  $\mu\text{m}$ である。素子全長は,  $f_m=40\text{GHz}$ に相当する約1050  $\mu\text{m}$ である。また, 光出力は, 無反射膜コーティングを施したDBR側端面から得ている。

また, 能動MLLDの場合, 高周波 (40GHz) の外部電気変調を印加するため, 素子の浮遊静電容量を極力低減する必要がある。そのため, 横方向のキャリア/光閉じ込め構造として, ポリイミド埋め込みによるリッジ構造を採用している。

また, 両素子のモジュール開発も進めている<sup>9) 11)</sup> (サンプル提供中)。図3は試作したモジュールの外観図と内部構造を示す。温度制御回路 (ペルチェ素子 (TEC) とサーミスタ), 反射戻り光防止の光アイソレータ, 光出力取り出しのための光ファイバなどをパッケージングした構造となっている。

モジュール構造の特長の一つは, 40GHzの高周波の変調電圧を効率的に入力するために, 変調信号印加部にスタブを用いたインピーダンス整合回路を採用していることにある。インピーダンス整合回路の採用により, 40GHz変調信号の入力効率が, 従来採用してきた50  $\Omega$ 終端構造に比べて, 約13dB改善されている<sup>9)</sup>。このことは, パルス幅の短パルス化, ならびにモード同期動作の同調周波数範囲の拡大に大きく寄与している。

モード同期動作は, 利得領域に電流注入し, EA変調器領域に逆バイアス電圧と40GHz正弦波変調電圧を与えることで得られる。

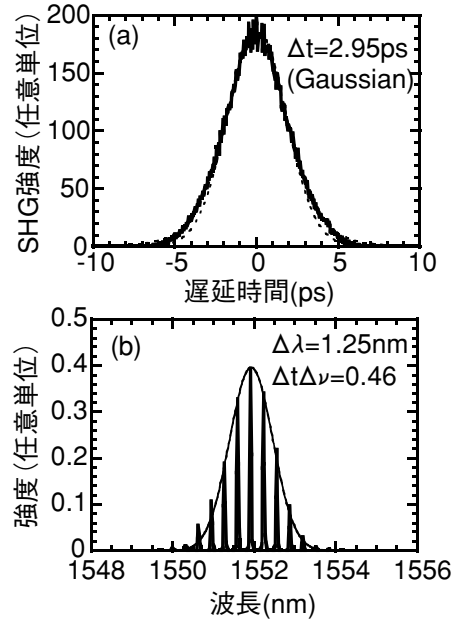
図4 出力パルスの (a) SHG相関波形と (b) 光スペクトル。  
図中点線はガウス波形によるフィッティング波形

図4は, 40GHz集積化能動MLLDからの光パルス出力の, SHG相関波形と, 光スペクトルの一例を示す<sup>9)</sup>。ここでは, 利得領域電流90mA, EA変調器領域に-1.25Vの逆バイアス電圧と, RFパワー20dBm, 周波数39.81312 GHzの正弦波電圧を印加した。相関波形から, ガウス波形を仮定すると, パルス幅としては2.95psと見積もられた。またパルスのOn/Off比としては30dB以上と見積もられた。また, 中心波長は約1552nmで, DBR領域のブラッグ波長とほぼ一致した。スペクトル幅は1.25nmであった。これらから, 時間帯域幅積は0.46と見積もられ, ガウス波形の変換リミット値 (0.44) に近い値が得られた。これから, 発生した光パルスは, フーリエ変換リミットに近い光パルスであると結論される。

また, モジュールからの平均光出力は, 約2mWであった。また, 時間ジッタは0.15ps程度, 相対強度雑音 (Relative Intensity Noise : RIN) ピーク強度は-140dB/Hz程度であり, 良好な時間ジッタ・強度ジッタ特性が得られた。

次に, 図5はRFパワーを変化したときの, パルス幅, 時間ジッタ, および時間帯域幅積の変化である。図中の実線は, 古典的な能動モード同期理論<sup>15)</sup>を用いた理論曲線である。RFパワーが17dBm程度までは理論曲線によく一致することがわかる。RFパワーをさらに増加させると, パルス幅は理論曲線から離れて, より一層短パルス化する。これは, EA変調器における吸収係数-印加電圧特性の非線形性によるものと考えられる。

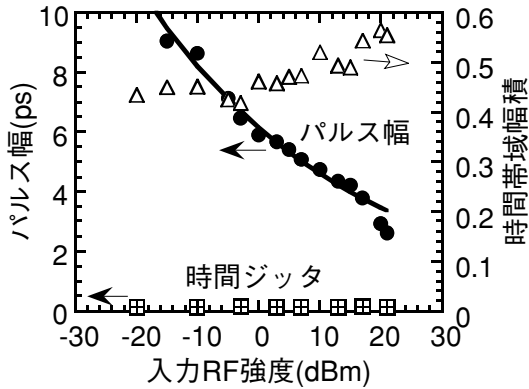


図5 パルス幅、時間ジッタ、時間帯域幅積のRFパワー依存性

従来構造（50Ω終端系）のMLLDとパルス特性を比較したところ、同じRFパワー（20dBm）印加時で、従来構造ではパルス幅が5ps程度なのに対し、インピーダンス整合回路を用いた今回のモジュールではパルス幅が3psと、パルス幅が約40%短縮化された。これは、インピーダンス整合により、実際に40GHz MLLDのEA変調器領域に入力される変調信号強度が増加したためと考えられる。このことは、本モジュールは、従来構造に比べて、低RFパワーで駆動でき、駆動電力を省電力化できることを意味する。

RFパワーを変化させても、時間ジッタに変化は見られず、変調電圧源の時間ジッタ（約0.15 ps）とほぼ一致した値が得られた。また、時間帯域幅積は0.4~0.6程度であり、低周波数チャープも維持された。

以上の結果から、集積化能動MLLDにおいては、低時間ジッタ・低周波数チャープの特長を維持しながら、パルス幅が3ps~10ps程度で可変な光パルスが発生できることがわかる。RZ方式で必要とされるパルス幅は、通常、信号時間間隔の1/4~1/2程度であり、これは40Gbit/sシステムで6ps~12ps、OTDMを併用した160Gbit/sシステムで1.5ps~3psに相当することを考慮すると、我々の開発した集積化MLLDは、40Gbit/s-160Gbit/s RZシステムに十分適用可能であると考えられる。

次に、はじめにも述べたが、集積化MLLDの同調周波数範囲は、実用化への鍵となる特性である。図6は、変調信号周波数を変化させたときの、パルス幅、時間ジッタおよびRINピーク強度の変化を示す。38.7GHz-41.2GHzの範囲に渡り、パルス幅、時間ジッタに変化は見られず、同等な光パルス発生が得られていることがわかる。

同調周波数範囲は、RIN値の劣化によって制限されている。仮に、同調周波数範囲をRIN値がその最良値（約-136 dB/Hz）から6dB劣化する範囲（強度ジッタが2倍に劣化する範囲）と定義すると、1.9GHz（39GHz-

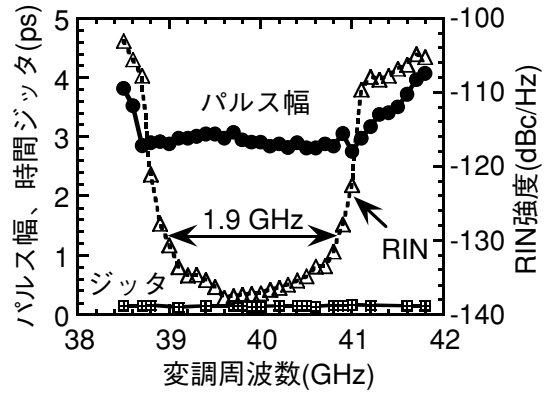


図6 周波数同調特性

40.9GHz）と見積もられた。

この同調周波数範囲は、50Ω終端系MLLDの同調周波数範囲（約400MHz）に比べ、約5倍に相当する。これもまた、パルス幅の短縮化と同様、インピーダンス整合により、変調信号入力効率が改善されたためと考えられる。また、この値は、共振器長の違いにして約50μmに相当する。これは、通常のへき開プロセスによる共振器長誤差（20μm程度）を十分にカバーする値である。このことは、我々の開発した40GHz集積化MLLDにおいては、周波数のシステムクロックへの同期が、通常の素子作製プロセスの精度の範囲内で十分可能であることを意味している。

## まとめ

本稿では、40Gbit/sないしはそれ以上のビットレートでの大容量光通信システムへの応用を目指した、40GHz光パルス光源の開発状況と、我々のチームで開発を進めている40GHz集積化能動MLLDのパルス特性について述べた。40GHz集積化能動MLLDの諸パルス性能が、システムの要求性能を十分満たしうるものであることを示し、実用的なパルス光源であることを示した。40Gbit/sおよび160Gbit/sでのシステム実証実験を現在進めている。

本稿では紙面の都合上述べなかったが、我々のグループでは集積化受動MLLDの開発も進めている。受動MLLDのユニークな点は、光パルス入力など光領域での制御が可能なこと、この利点はたとえば、超高周波数（100GHz以上）MLLDのパルス発生制御などに応用されている<sup>16)</sup>。

また、本稿では、光通信システムの送信器としての応用を主眼に説明したが、集積化MLLDの応用分野は近年さらに広がりを見せている。たとえば、集積化MLLDを用いたクロック抽出技術<sup>8)</sup>は、光通信システムの再生中継器や、受信端での応用が期待される。また、モード同期

レーザの光スペクトルは、等間隔・同位相で並んだ多数のレーザ発振モードで構成されることを利用して、WDMシステムでの多波長光源として応用する試みも報告されている<sup>17)</sup>。

本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から研究を委託されたフェムト秒テクノロジー研究機構(FESTA)の研究の一環として行った。◆◆

## 参考文献

- 1) K. Fukuchi *et al.*: 10.92-Tbit/s (273×40Gbit/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiments, OFC2001, PD24, 2001
- 2) H. Kawanishi *et al.*: Over-40GHz modulation bandwidth of EAM-integrated DFB laser modules, OFC 2001, MJ3-1, 2001
- 3) H. Murai *et al.*: Single channel 160Gbit/s carrier-suppressed RZ transmission over 640km with EA modulator based OTDM module, ECOC2003, Mo3.6.4, 2003
- 4) H. Takara *et al.*: 20GHz transform-limited optical pulse generation and bit-error-free operation using a tunable, actively modelocked Er-doped fiber ring laser, Electron. Lett., vol.29, p.1149, 1993
- 5) 原田他: 40GHz再生モード同期ファイバーレーザの発振特性, 2004年電子情報通信学会総合大会, C-4-19, p.347, 2004年
- 6) H. F. Liu *et al.*: Tuning characteristics of monolithic passively mode-locked distributed Bragg reflector semiconductor lasers, IEEE J. Quantum Electron., vol.32, p.1965, 1996
- 7) K. Sato *et al.*: Frequency range extension of actively mode-locked lasers integrated with electroabsorption modulators using chirped gratings, IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol.3, p.250, 1997
- 8) I. Ogura *et al.*: Precise operation-frequency control of

monolithic mode-locked laser diodes for high-speed optical communication and all-optical signal processing, Opt. Quantum Electron. Vol.33, p.709, 2001

- 9) S. Arahira *et al.*: 40GHz actively mode-locked distributed Bragg reflector laser diode module with an impedance-matching circuit for efficient RF signal injection, Jpn. J. Appl. Physics, vol.43, No.4B, p.1960, 2004
- 10) R. S. Tucker *et al.*: 40GHz active mode-locking in a 1.5 mm monolithic extended-cavity laser, Electron. Lett., vol.25, p.621, 1989
- 11) S. Arahira *et al.*: 40GHz hybrid modelocked laser diode module operated at ultra-low RF power with impedance-matching circuit, Electron. Lett., vol.39, p.287, 2003
- 12) R. Kaiser *et al.*: Tunable monolithic mode-locked lasers on InP with low timing jitter, IEEE Photon. Technol. Lett., vol.15, p.634, 2003
- 13) S. Arahira *et al.*: 20GHz subpicosecond monolithic modelocked laser diode, Electron. Lett., vol.36, p.454, 2000
- 14) S. Arahira *et al.*: Terahertz-rate optical pulse generation from a passively mode-locked semiconductor laser diode, Opt. Lett., vol.19, p.834, 1994
- 15) H. A. Haus: Modelocking of semiconductor laser diode, Jpn. J. Appl. Phys., vol.20, p.1007, 1981
- 16) S. Arahira *et al.*: 480-GHz subharmonic synchronous mode locking in a short-cavity colliding-pulse mode-locked laser diode, IEEE Photon. Technol. Lett., vol.14, p. 537, 2002
- 17) T. Morioka *et al.*: 100Gb/s\_10channel OTDM/WDM transmission using a single supercontinuum WDM source. OFC1996, PD-21, 1996.

## 筆者紹介

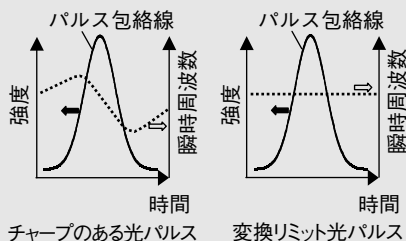
荒平慎: Shin Arahira. 研究開発本部 先端デバイスラボラトリ  
小川洋: You Ogawa. 研究開発本部 先端デバイスラボラトリ  
TL

## TIPS

## 【用語解説】

### 周波数チャープ, フーリエ変換リミット, 時間帯域幅積

一般に光パルスと呼んでいるのは, 光強度の時間変化の包絡線のこと, その内部では, 光電界は, 波長に対応する周波数(波長1.5 $\mu$ mのときで200THz)で振動している。周波数チャープとは, 光パルス内部で, 光電界の瞬時周波数が時間的に変化していることを指す(図参照)。



瞬時周波数が変化しない光パルスをフーリエ変換リミット光パルスという。また, 光パルスのパルス幅と, その周波数スペクトルの半幅積の積を時間帯域幅積と呼び, パルス波形によって決まったある最小値(変換リミット値)より大きな値を持つ。最小値を持つとき, 光パルスはフーリエ変換リミットであるため, この値により, 光パルスの周波数チャープの大小をある程度評価できる。

### SHG相関波形(相関計)

マイケルソン干渉計と, 第2次高調波(SHG)を発生する非線形光学結晶とで構成された強度相関計であり, 高い時間分解能を持つ為, 光パルス波形の測定に一般的に用いられる。