

# 通信・計測を支える短光パルス発生・計測技術

野中 弘二

\*\*高知工科大学工学部

〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185

E-mail: nonaka.koji@kochi-tech.ac.jp

**要約：**短光パルス技術は高速の電子素子や物質の過渡応答の計測や光速の光通信に非常に有益な技術である。特に光パルスのタイミングの制御は安定な信号処理、高精度計測や光時間多重通信システムにはもっとも重要である。我々は非常に高品質で、融通性の高い光パルス発生装置を開発した。本装置はレーザーダイオードに自己パルス制御帰還機能を盛り込むことによって、コンパクトな構造にもかかわらず0.5 GHz～3 GHzの範囲で繰り返し可変なパルス列を1ピコ秒以下の非常に少ない時間揺らぎで発生することが可能である。同時に、伝送されたパルスのフェムト秒レベルの非常に高精度なタイミング揺らぎの計測・制御装置も開発している。これらの技術は光ファイバ敷設領域の温度や外力ひずみによる変動などを検知する環境センサとして非常に高感度であり威力を発揮することを確認している。

**Abstract :** Optical short pulse is useful for signal measurement of highspeed electronics, material dynamics and optical communications. Especially, pulse timing control is most important for stabilizing short pulse processing such as optical time-division multiplexers (OTDM) and high resolution measurement systems. We realized a very high quality and flexible pulse generator and monitor system.

We have developed an compact ultra-low time-jitter pulse generator using laser diode (LD) and self-pulse feedback mechanism. Sub-picosecond low time jitters are successfully observed at any modulation range of between 0.5- and 3-GHz. The pulse generator's size and cost are similar to conventional LD module. Also, femtosecond pulse-timing monitor and stabilizer technique using optical double pulses and their cross-correlation signals is simultaneously developed. These techniques are very efficient for fiber environmental measurement such as temperature or strain fluctuation.

## 1. はじめに

20世紀後半の電話を中心としたナローバンドのアナログ通信が一巡し、現在は高速デジタルデータ通信が既に普及して、インターネット

上には常時相当量のトラフィックが流通している(1)。特に日本においては光通信を前提としたブロードバンドアクセス環境が急速に発展して、それを支える超超広帯域基幹網や光通信制

御装置、ひいては信号を処理する電子部品に至るまで電子物性の限界に迫るほどに高速・高品質化が要求されている(2)。これらの先端システムや部品・装置を構築・運用・監視・性能評価するためには電気高周波の限界に依存しない計測装置・監視手法が求められている。一方21世紀の科学、人類、地球、生命環境は激変しており物質や環境の安定で簡単な評価の手法は熱望されている。

従来より詳細な物理化学計測・評価・超高帯域な通信手段においては様々な波長や波形品質の光信号照射とその応答信号の分析が高精度の科学的評価手法として用いられてきた。本稿では、あらゆる波長や繰り返し周期に対応可能な光パルス発生機構をめざし、安価でコンパクトな半導体レーザの構成を複雑にすることなく実現する技術の開発状況を解説する。また同時に、高品質なパルスであるほど、応答信号の分析も高度な技術や機器が必要になりがちである。そこで、光信号の合成・比較の原理を駆使して、非常に簡単でコンパクトな構成で、パルス幅の1/100程度の高分解能な揺らぎ測定可能な計測技術も開発したのでこれについても報告する。

## 2. 高品質光パルス発生技術

我々は非常に簡単でコンパクトな構成であらゆる波長や繰り返し周期に対応可能な光パルス発生機手手段とし半導体レーザの利得スイッチング方に注目してきた。図1に利得スイッチングレーザの電力注入と光発生のタイミングチャートを示す。利得スイッチング法はごく一般的な半導体レーザに一定以上の急激な注入電流の変調を与えれば、その変調の立ち上がり時に注入された励起エネルギーの蓄積により、やや遅れて急激にレーザ発振がたちあがるため急峻で強力な光パルスが発生する。発振が安定状態になるまえに、エネルギー注入を停止すれば最初の急峻なピークのみを利用してパルス発生させることができる。変調電気信号の立ち上がりより

遙かにシャープな短光パルス発生が広い繰り返し周波数はんにて任意に簡単に実現できるため、ファイバの故障監視や距離計測のための光路時間基準光源として用いられている。しかし、光信号の立ち上がりに比べればゆっくりとした変調電力の蓄積と発振の立ち上がり遅れを利用するため、蓄積励起エネルギーの自然放出光による消費揺らぎなどの不安定要因によりパルス発生タイミングが著しく揺らぐことが性能限界と活用範囲を制限していた(3)。

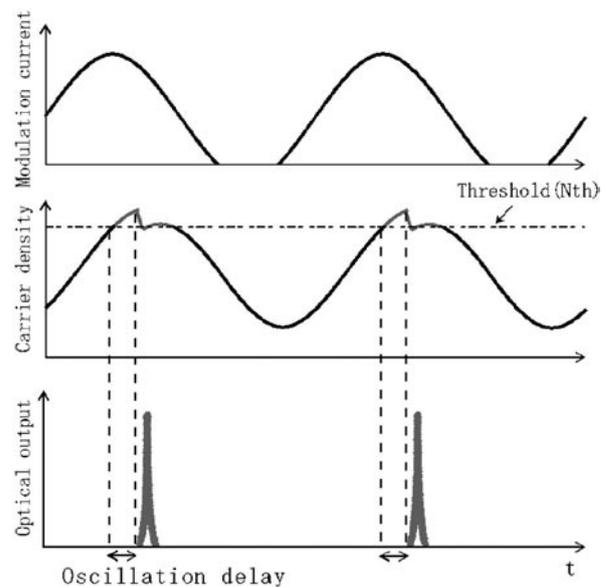


図1：利得スイッチングレーザのパルス発生タイムチャート（上から 励起電流、キャリア密度、出力光強度波形）

そこでレーザ発振器の発振前の蓄積エネルギーを安定化させる手段として、外部から近接する波長の光を注入する手法が我々も含めいくつか提唱されたが、半導体レーザ本体に比べ、外部光注入するための装置群の方が遙かに複雑で高価になるため既存の高価だが確立された短光パルス発生技術との差別化が難しかった。

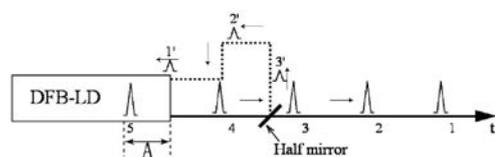


図2：発生パルスのLD共振器への帰還機構

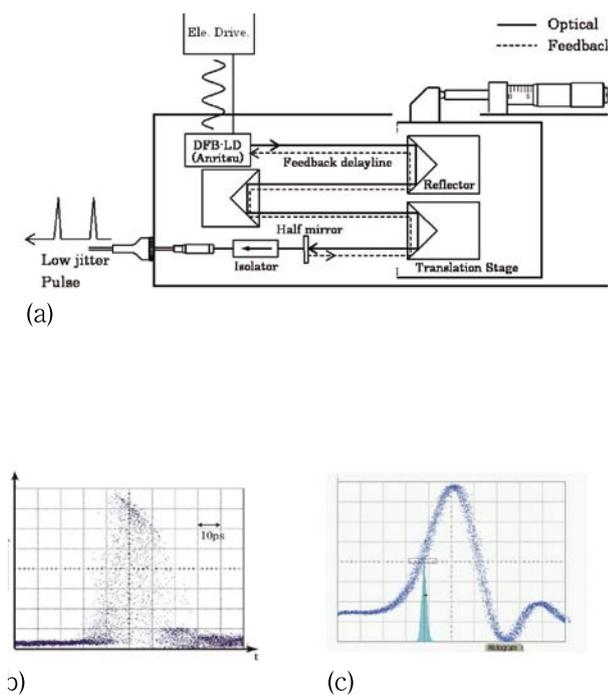


図3：(a) 光帰還タイミングのコリメートビーム光路長調整機能を有するLDモジュール (b) 光帰還無いパルス波形 (c) 光帰還条件調整済みのパルス波形

我々はパルスの品質(タイミング揺らぎ:ジッタの抑圧)を高めるために図2に示すように光を注入手段として発生したパルスの一部を帰還するという簡単な手段を採用したが、詳細な調査研究の結果、発振前のある一定のタイミング、光パワー、偏光状態では非常にタイミング揺らぎに有効であること、その条件はピンポイントではなく幸ある一定の許容幅があること、別の状態で光帰還すると発振状態が複合共振となりむしろパルス品質が不安定になることを突き止めた(3)。この高品質パルス発生条件を半導体レーザが短光パルス発振可能な殆どの変調周波数で、しかも安価に簡単な調整で実現可能な構造を、以下に述べる2つの手法で実現した。

図3(a)に第1の手法で作成したモジュールとその条件が悪い場合(b)と適性条件(c)に設定した場合の光パルス波形を示す。半導体レーザから出力された光パルスをコリメートレンズで平行ビームにして、出力用の光ファイバにレンズで集束するまでの光路中にガラスにコーティングした部分反射ミラーを設ける。ここで

反射された光パルスの一部が再び半導体レーザ導波路に注入されることによりレーザ発振のタイミングを安定化させることができる。しかし、発生した光パルスを光帰還させ次のパルスの制御に活用できるタイミング、つまり折り返し光の最適帰還時間は繰り返しパルス発生の間隔(変調周波数)で異なる。また、GHzという一般的には高繰り返しの変調においても、光の速度では次のパルス発生までに30cm程度の長い光路長を必要とする。そこで平行ビームの光路をコーナリフレクタで3度折り返し、さらに2つのコーナミラーを一体で平行移動することにより長い光路と大きな光路長変動可能範囲を実現している。スクリー式のマイクロメータはわずか25mm程度しか移動できないが、複数折り返し構造によりその8倍の光路長調整が可能となっている。図(b)(c)に示すように、光帰還効果が有効でない場合、パルス幅と殆ど同じほど大きなタイミング揺らぎで波形品質が低下しているが、わずかな調整で0.5GHzから3GHzまでのこの半導体レーザチップがパルス発生可能なすべての繰り返し周波数においてタイミング揺らぎ1ps以下の非常に高品質なパルス列が得られることを確認している(4)。

上記可変光帰還条件調整機構付き半導体レーザモジュールはほぼすべての繰り返し周波数に対応可能で大変有効な計測用光源であるが、調整範囲を大きく取るための工夫が、モジュール構成を比較的繊細な光軸調整が必要で大型なものにしてしまっている。従来の短光パルス光源に比べれば遙かに小さく安価であるものの、まだ廉価・単純で量産に適した構造とは言い難い。そこで、知見より得られたパルスタイミング抑圧条件を、従来の安価でコンパクトな半導体レーザモジュールと殆ど同等な構成で実現する手段を考案した。開発したモジュールの外観図を図4に示す。

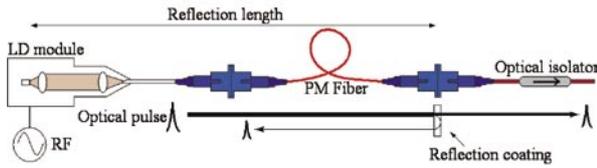


図4：コンパクトで簡便な構造の低タイムジッタ光パルス発生LDモジュール

従来モジュール内部に設置されるべき反射戻り光雑音防止装置（光アイソレータ）を外付けの光ファイバ接続にし、モジュール出力のファイバピグテールを長さを調整した出力伝送路兼光帰還導波路として活用する。ファイバコネクタの表面には所望の反射率の部分反射コーティングが施されており、ファイバ導波路は導波中の偏光方向が安定する偏波保持ファイバを用いている。空間ビーム系に比べ遙かに長尺の光帰還光路長が設定できるため、低い繰り返し周波数においても所望のタイミングでパルス制御を行うことができる(5)。また長尺ファイバが光路としてそのまま活用できるため、たとえばN番目出力パルスは時間的に大きく離れたN + M番目やN + M + 1、N + M - 1番目のパルス発生に影響を与えることができるため飛び飛びではあるが同じファイバ長設定で複数の繰り返し周波数に安定に対応できる。好適な条件はピンポイントではなく10%程度の許容幅があるため、利用者が望むたいの繰り返し周波数は条件の中え選択することができる。それでも所望の周波数に一致しない場合は間に光路長調整用にファイバケーブルを付与するだけで異なる周波数群に対応できるため、モジュール作成時や動作時の調整が全く不要で、簡単にコンパクトな構成のままで高品質のパルスを実現することができる。図5に一つのファイバ長で、高品質（低タイムジッタ）のパルス発生可能な周波数領域の分布をグラフ化した。飛び飛びではあるがかなり多数の周波数に対応可能であることが分かる。パルス品質も詳細な計測に

より、たとえば繰り返し周波数1.6GHzの場合、非線形圧縮をかければパルス幅1.9ps、タイムジッタ0.5ps以下が簡単に達成できることが化確認できた。

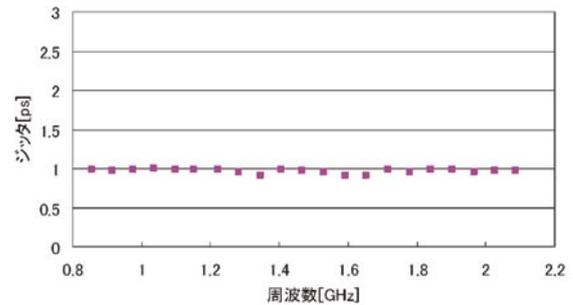


図5：パルス繰り返し周波数と低ジッタ条件の関係

### 3. 高時間精度パルス信号計測技術

前節で述べたように、通常の半導体レーザモジュールと変わらない非常にコンパクトで安価な構成で繰り返し周波数が任意に変でタイムジッタが非常に小さい（高品位短光パルス発生技術）を実現した。一方時間的に高品位の短光パルスを評価対象に照射・通過した際の変質を高精度で検知することは物理計測としては非常に有効ではあるが高い技術と高価な機器を必要とするものであった。

たとえばファイバ伝送路周辺環境（主に引っ張り歪み、環境温度変動）変化による伝送パルスの波形・タイミング変動を高精度に観測しようとする、光受信・電子的時間処理を行う計測部分で超高速で高価な電子計測器を必要としている。そこで我々は高価な高周波電子装置を使わずに0.1ピコ秒以下の超高精度で計測する（超高精度パルス伝送タイミング計測技術）を考案した。図6に本装置の外観をしめす(7)。

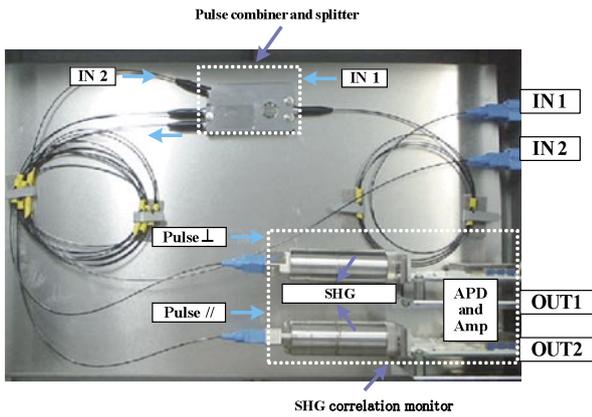


図6：高精度光パルス信号観測装置

測定原理は光パルスの重ね合わせにより相関信号の大小を比較するクロスコリレーションである。パルスの位置や波形をモニタする手段としては、光非線形現象を利用した相互相関測定法を用いている。基準となる光パルス信号を分割し、一方を基準パルスとして用い、他方を測定対象の長尺光ファイバなどを通過させた後測定信号として別ポートから測定信号として入射させる。基準信号は装置内で光学的手法を用いてタイミングと偏光方向の異なる2つの直交するパルスに分割されている。この異なる基準と測定パルスを重ね合わせて相関信号を同時に2チャンネル計測する。各々の光パルスの重ね合わせた状態（パルス間の相互時間位置関係）の変動は、光信号の瞬時ピーク強度により生ずる2倍高調波光（SHG）平均強度の変動を安価な光受信器で測定することにより、高周波の電子素子を全く使わなくても容易に計測することができる。相互の値の和、平均値、差を取ることによってパルスのタイミングのずれ量だけでなく、計測環境を通過したことによる信号強度の変動、パルス波形の劣化など様々な揺らぎ情報を分離した値として同時に入手することができる。

しかし、単にパルスの変動を相関法でモニタするだけでは、環境歪みによる偏光変動、温度変化によるファイバ伸縮に起因する時間位置変動、屈折率変化による波形劣化変動が複合し

た形で現れる。1チャンネルのスカラー量による計測では環境変動が生じた場合、信号強度の変動、タイミングの変動、波形ひずみの変動など異なる揺らぎ情報の分離や変動方向の特定が難しい。この複数チャンネルによる差動検知の手法はどれにより信号が変動するのかを容易に想像することができる。図7に引っ張り歪み量（引っ張り微動台の移動量）と、パルスの時間位置による本測定装置の出力電力信号の関係を示す。中心点近傍では非常に線形性よく引っ張り量と計測信号値が対応し、変動方向によって符号が変化するため変動量だけでなく変動方向も正しく計測できる可能性を示唆している。今回試作した計測器は30フェムト秒程度の非常にわずかなファイバ長の温度伸縮や30 $\mu\epsilon$ 程度のわずかな引っ張り歪み変動も十分検知できることが確認された(6)。

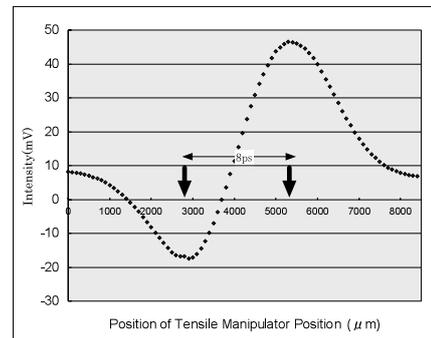


図7：ファイバの引っ張り歪み量とパルスタイミング測定器の相関出力電圧の関係

最近では図8に示すように、長尺のファイバ伝送路による敷設環境のセンシングに応用し、パルスの周期性と重なり相関を利用して、超高時間精度と、広帯域の時間変動を両立した測定を行うため、偏光依存性の解消などフィールド環境での長期安定的運用のための基本検討を進めている。

パルスの位置や波形変動をモニタする既存の方法としては、光非線形現象を利用した相互相関測定法を原理として用いているが、単にパルスの変動を相関法でモニタするだけでは、偏光

変動、時間位置変動、信号強度変化などが複合した形で現れ、その変動方向も特定できない。本技術では光レベルでパルス相関信号の差分検知を行っているため高速低雑音の電子回路を必要とせず信号強度が変動しても誤動作しない、長期信頼性が高いという利点がある。分散型の測定であるため、監視伝送路中の変動位置特定は難しいが、広域経路の平均値としての高精度な同時監視、変動要因特定には威力を発揮する。保有するパルス発生技術を用い、様々な種類(波長、偏光、分散量、パルス間隔)のパルス列を順次送信して変動量を比較することにより変動要因と量を特定することが可能となる。

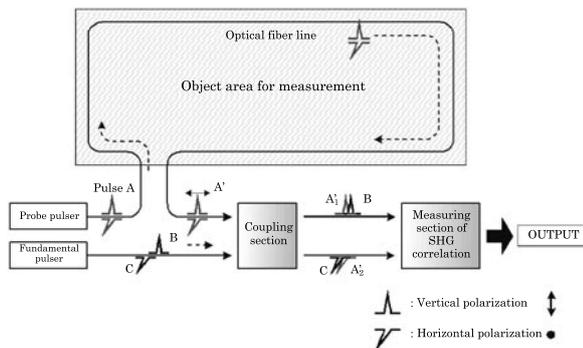


図8：高精度パルス測定器を用いた環境揺らぎモニターのイメージ

#### 4. まとめ

本稿では、非常に簡単なコンパクトな構成で、様々な繰り返し周波数・波長に対応可能な低たいむじった短光パルス発生装置と、非常に高精度なパルスタイミング、ひいては伝送路歪み・伸縮計測装置の開発状況について報告した。いずれも簡単な光学素子構成を工夫することにより、ピコ秒を遙かにしのぐ時間安定度、計測分解能実現している。将来の信号監視、科学計測、環境監視分野での活用が期待される。

#### 文献

- (1) 総務省：我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計：  
<http://www.soumu.go.jp/>, 2005
- (2) H. Takara, S. Kawanishi, A. Yokoo, S. Tomaru, T. Kitoh, and M. Saruwatari, "100Gbit/s optical signal eye-diagram measurement with optical sampling using organic nonlinear optical crystal," Electron. Lett., vol.32 pp.2256-2258, 1996
- (3) A. Takada, T. Sugie and M. Saruwatari, "High-speed picosecond optical pulse compression from gain-switched 1.3  $\mu$ m distributed feedback laser diode through highly dispersive single mode fiber," J. of Lightwave Technol., vol. LT-5, pp.1525-1533, Oct.,1987.
- (4) K. Nonaka and H. Mizuno, "Sub-Picosecond Timing Jitter Suppression Using an Optical Feedback Mechanism for a laser diode Short Pulse Generator" Meas. Sci. Technol. 15, pp. 1581-1585, 2004
- (5) K. Nonaka and H. Mizuno "Simple, Small Size, Low cost and Low Time Jitter Optical Pulse Generator with Wide Range Tunable Repetition Rate" LEOS Summer Topical Meeting, TuB3.4, San-Diego, 2005.
- (6) H B Song, T.Suzuki, M. Sako an K. Nonaka "High Time Resolution Distributed Fiber Optic Sensing System Based on Correlation and Differential Technique" Meas. Sci. Technol. 17 631-634. 2006.