

2 光源技術

2 Light Source Technologies

2-1 光パルスのフーリエ合成

2-1 Fourier Synthesis of Optical Pulses

兵頭政春 カジ・サルワル・アベディン 小野寺紀明 渡辺昌良
HYODO Masaharu, Kazi Sarwar ABEDIN, ONODERA Noriaki, and WATANABE Masayoshi

要旨

近年の光通信技術の急速な進展に伴い、超高速・超高繰り返し周波数の光パルス列を発生させる技術への関心が高まっています。従来のモード同期レーザーでは繰り返し周波数に限界があり、それに替わる新しい光パルスの発生法として、フーリエ合成法が注目されています。フーリエ合成法は、独立に発振する複数のレーザー光の振幅や位相をうまく調整して重ね合わせるにより、フーリエ級数展開の逆の原理で任意の波形、任意の繰り返し周波数を持つ光パルス列を発生させることを可能にする技術である。筆者らは、3台の半導体レーザーの出力光をフーリエ合成することにより、9.6 GHz から 1.8 THz に至る任意の繰り返し周波数の光パルス列を安定に発生できることを実証した。また、フーリエ合成された光パルス列が外部の安定な光クロックに容易に同期できることを実証した。本論文では、これらの一連の研究成果について紹介するとともに、任意波形発生機能の応用として、フーリエ合成法による任意ビットパターン列の連続生成法についても述べる。

With the rapid progress made recently in the field of optical communication technology, much attention is being focused on the techniques for generating ultrafast optical pulses with an ultra-high repetition frequency. Fourier synthesis is one of the most promising techniques for doing this, because, unlike in conventional techniques such as mode-locking, there is no limitation on having an arbitrarily high repetition frequency. Fourier synthesis is also used to synthesize arbitrary waveforms based on the inverse process of Fourier-series expansion. We have demonstrated the generation of ultrafast optical pulses with repetition frequencies from 9.6 GHz to as high as 1.8 THz by synthesizing the outputs from three independently oscillating semiconductor lasers. We have also demonstrated that the Fourier-synthesized pulses could be synchronized to an external optical clock. This paper describes the outlines of the above experiments as well as a technique for successive generation of arbitrary bit streams.

[キーワード]

光パルス発生, フーリエ合成, 光位相同期ループ, 半導体レーザー, 四光波混合
Generation of optical pulses, Fourier synthesis, Optical phase-locked loops, Semiconductor lasers, Four-wave mixing

1 はじめに

繰り返し周波数が自在に制御可能な高品質な

パルス光源は、次世代の大容量光通信システムにおいて欠かすことのできない要素技術である。とりわけ直列処理型全光 TDM 方式 [1] において

は、データを重畳化するためのキャリアとして、繰り返し周波数がTHz領域にある高安定なパルス光源の開発が望まれている。これまでにモード同期レーザを用いて1.54 THz[2]、平面光波回路(PLC)を用いて1.28 THz[3]のパルス光が発生されているが、これらの方法ではパルスの繰り返し周波数が共振器長によって制限され、自由に变化させることができなかつた。また、PLCではパルス間のジッタが導波路の加工精度で決まるため、高繰り返し化に限界があつた。

これらの制約を一切受けない光パルスの発生法として、フーリエ合成法が注目されている。フーリエ合成法は、複数の連続波(continuous wave, CW)発振レーザを光源として用い、それらの出力光の位相を精密に制御して重ね合わせることににより、フーリエ展開の逆の原理で任意の波形の光パルスを合成する技術である。フーリエ合成で発生される光パルスの繰り返し周波数は、フーリエ成分となる個々のレーザの発振周波数差に等しく、レーザの共振器長には依存しない。また、繰り返し周波数は個々のレーザの発振周波数を変えるだけで容易にチューニングが可能であり、繰り返し周波数に原理的な制約がない。

フーリエ合成は、1977年にHayesら[4]によって初めて実現された。彼らは5台の炭酸ガスレーザを光源として用い、互いの発振周波数差を120 MHzに設定し、隣り合うレーザ間の位相差を電子回路技術を用いて同期させることににより、120 MHzのパルス光を発生させることに成功した。彼らが行つたように、レーザ間のビート信号を電子回路で直接制御する方法では、電子回路の応答速度が事実上の繰り返し周波数の上限となる。また、この限界を超える高繰り返しの光パルスを発生させる方法として、光領域での波長変換を利用する方法が1993年にMukaiら[5]によって提案された。彼らは3台のCWレーザを光源とし、1台のレーザの第2高調波光と残る2台のレーザの和周波光の位相を比較し、それらの位相差が一定になるように負帰還制御を行うことにより、光パルスが合成されることを実験的に示した。ただし、彼らの実験ではビート信号を外部の基準電圧と比較して誤差信号を得たため、位相差は零にならず、繰り返し周波数も600

MHzが限界であつた。

我々は、フーリエ合成法を用いて、光通信で利用される1.5 μm の波長帯においてTHzの繰り返し周波数を持つ光パルス列を安定に発生させることを目的として研究を開始した。その目的を達成するためには、非線形波長変換の位相整合条件を緩和するとともに、位相同期技術を改良する必要があつた。

まず、非線形波長変換として、第2高調波発生(second-harmonic generation, SHG)の替わりに3次の非線形効果である四光波混合(four-wave mixing, FWM)に着目した。一般にFWMはSHGに比べて位相整合条件が緩く、またすべての光学系を単一モード光ファイバを使って構成できるようになるため、完全な波面整合が容易に実現できる。特に1.5 μm の波長帯では、優れたFWM機能を持つ半導体光増幅器(semiconductor optical amplifier, SOA)が開発されつつあり[6]、本研究の目的に好都合である。ただし、1.5 μm 帯で発振する半導体レーザは一般に周波数変調帯域が狭く、そのままでは光位相同期ループ(optical phase-locked loop, OPLL)に適していないことが分かつた。そこでレーザの共振器中に電気光学結晶を配置し、その結晶を低コンプライアンス材で拘束することによってピエゾ電気効果による機械的共振を除去する方法を考案し、OPLLに十分な変調帯域を確保することに成功した。また、位相同期技術の改良として、ビート信号の検出の際にFMサイドバンドヘテロダイナ法を用いることにより、微弱なFWM光しか得られない場合でも高精度なOPLLが実現できるように工夫した。

本報告では、はじめにフーリエ合成の原理について概観し、次に上に述べた一連の研究成果として1.81 THzの光パルスをフーリエ合成した実験についての概略を述べる。さらにフーリエ合成された40 GHzの光パルス列を外部から供給される8 GHzのクロック信号に同期させる実験について述べる。また、フーリエ合成の応用の一例として、任意ビットパターンやダークパルスの発生法について紹介する。

2 フーリエ合成の原理

はじめに、強度の等しい3つのレーザー光をフーリエ合成してできる光パルスの時間波形について考える。レーザー光 $i (i = 1, 2, 3)$ の電場の振幅を A 、位相を Φ_i 、中心角周波数を $\omega_i (\omega_1 > \omega_2 > \omega_3)$ 、位相揺らぎを $\phi_i(t)$ とすると、レーザー光 i の電場 $E_i(t)$ は複素数を用いて次のように表すことができる。

$$E_i(t) = A \exp[j\Phi_i] \quad (1)$$

$$\Phi_i = \omega_i t + \phi_i(t) \quad (2)$$

3つのレーザー光を重ね合わせた光の強度の時間波形 $I(t)$ は $|\sum E_i(t)|^2$ を計算することによって得られ、

$$I(t) = 3I_0^2 + 4I_0^2 \cos(\Delta\phi/2) \cos[\Omega(t + \delta)] + 2I_0^2 \cos[2\Omega(t + \delta)] \quad (3)$$

となる。ただし、

$$\Omega \equiv \omega_1 - \omega_2 = \omega_2 - \omega_3 \quad (4)$$

$$\Delta\phi \equiv \phi_1 - 2\phi_2 + \phi_3 \quad (5)$$

$$\delta \equiv \frac{\phi_1 - \phi_3}{2\Omega} \quad (6)$$

であり、 I_0 は1つのレーザー光の強度である。 $\Delta\phi$ が定数の時、 $I(t)$ は繰り返し周波数が $f = \Omega/2\pi$ でタイミングジッタ δt を伴う定常的なパルス列になることが分かる。図1は $\delta t = 0$ とし、 $\Delta\phi$ をパラメータとして(3)で表される $I(t)$ を4周期分にわたって計算した結果である。 $\Delta\phi$ は 4π を周

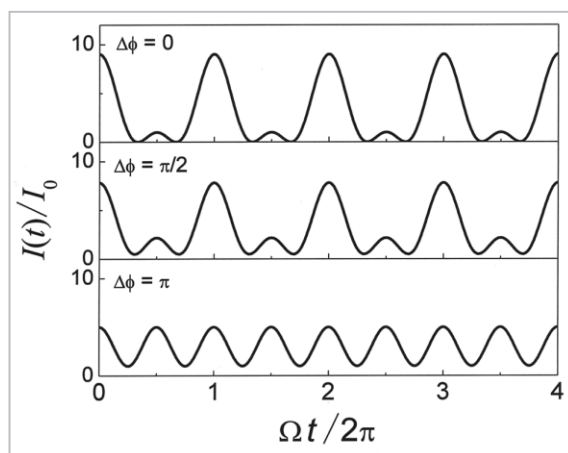


図1 位相が同期した3つのレーザー光によって合成される光パルス列の時間波形
 $\Delta\phi$ については本文を参照。

期として $I(t)$ の形状を決定し、 $\Delta\phi$ が 0 または 2π の整数倍の時に尖頭値が最大で幅が最小となり、理想的なパルス波形になる。

(4) は3つのレーザー光が等しい周波数間隔を保つことを意味するが、さらに $\Delta\phi$ が定数となるのは、次の位相同期状態

$$\Phi_1 - 2\Phi_2 + \Phi_3 = \Delta\phi = \text{const.} \quad (7)$$

が確立された場合である。これはFWMなどの非線形波長変換作用と一つのOPLLを組み合わせることで実現することができる。図2にその原理を示す。 E_2 と E_3 を3次の非線形媒質に同時に入射させると、FWMが発生して高周波数側にアンチ・ストークス光 E_{AS} 、低周波数側にストークス光 E_S がそれぞれ発生するが、アンチ・ストークス光の角周波数は $2\omega_2 - \omega_3$ に正確に等しい。OPLLは電気的な負帰還制御を行って二つのレーザー光の間の位相差を一定に保つ技術であり、これを利用して角周波数 ω_1 の E_1 を E_{AS} に位相同期させれば(7)が保証される。

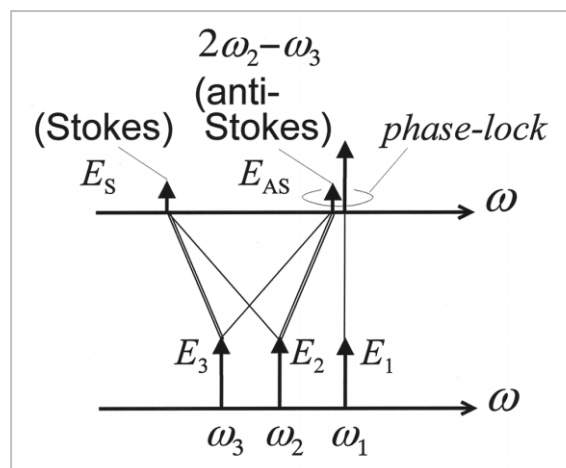


図2 四光波混合を用いて位相同期状態を実現する原理

独立な3波の合成で得られる光パルスの半値全幅 Δt は、 $\Delta\phi = 0$ の時に最小となり、 $\Delta t \cong 0.311 / f$ である。

N 個のレーザー光が互いに位相同期して光パルス列を形成する場合、最小限必要なOPLLの数は $N - 2$ である。この場合、 $N - 2$ 個のレーザー光の位相がOPLLによって完全に制御され、残る2個はフリーランニングである。パルスが正確に繰り返して発生されるためには、隣り合ったレーザ

光の角周波数差がすべて等しく Ω となる位相同期状態でなければならない。 N 個の光強度の等しいレーザー光をこの条件でフーリエ合成した場合に得られる光パルス列の時間波形は、

$$I(t) = \left| \sum_{i=1}^N \exp[j(\omega_i t + \phi_i)] \right|^2 = \left[\frac{\sin \frac{N\Omega}{2}(t-t_0)}{\sin \frac{\Omega}{2}(t-t_0)} \right]^2 \quad (8)$$

である。ここで t_0 はタイミングジッタであり、 m 番目と n 番目($m < n$)のレーザーをフリーランニングとして残した場合、他のレーザーの位相同期が完璧に行われれば、

$$t_0 = \frac{\phi_m - \phi_n}{(n-m)\Omega} \quad (9)$$

である。パルスの半値全幅 Δt は N が十分に大きい場合は近似的に $\Delta t \approx 0.886 / (Nf)$ であり、 $N = 3$ に対するこの近似式の誤差は5%程度である。

パルスの繰り返し周波数が数十GHzを超えるようになると、オシロスコープを使って時間波形を直接観測することが不可能になる。このような場合は自己相関波形によって間接的に時間波形を推定せざるを得ない。光強度の等しい3つのレーザー光をフーリエ合成して光パルスを生じさせる場合、得られる自己相関波形は、(3)を使って、

$$\begin{aligned} \Gamma_I(\tau) &\equiv \langle I(t)I(t+\tau) \rangle \\ &= 9I_0^2 + 4I_0^2 \cos(\Omega\tau) [1 + \langle \cos \Delta\phi \rangle] + 2I_0^2 \cos(2\Omega\tau) \end{aligned} \quad (10)$$

となる。ただし、 $\Delta\phi$ 、 δt の変化はゆっくりしていて、遅延時間 τ の間のこれらの変化は無視できるものとした。一般に $\Delta\phi$ は非定常的な揺らぎであるが、位相同期が成立している状態では、その分散は有限な値に収束し、 $\Delta\phi$ は定常的なガウス統計に従って揺らぐものと見なすことができる。その平均値を $\Delta\phi_{av}$ 、分散を $V_{\Delta\phi}$ とすれば、ガウスのモーメント定理^[7]を用いて、(10)は、

$$\begin{aligned} \Gamma_I(\tau) &= 9I_0^2 + 4I_0^2 \cos(\Omega\tau) [1 + \gamma \cos(\Delta\phi_{av})] \\ &\quad + 2I_0^2 \cos(2\Omega\tau) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\gamma \equiv \exp\left(-\frac{1}{2}V_{\Delta\phi}\right)$$

と書き直すことができる。以後、 $\Delta\phi_{av}$ を単に $\Delta\phi$ と書くことにする。 $V_{\Delta\phi}$ は位相同期状態における残留位相揺らぎであるが、 $V_{\Delta\phi}$ が0.1 rad²程度であれば $\gamma = 0.951$ であり、事実上1に等しいと考え

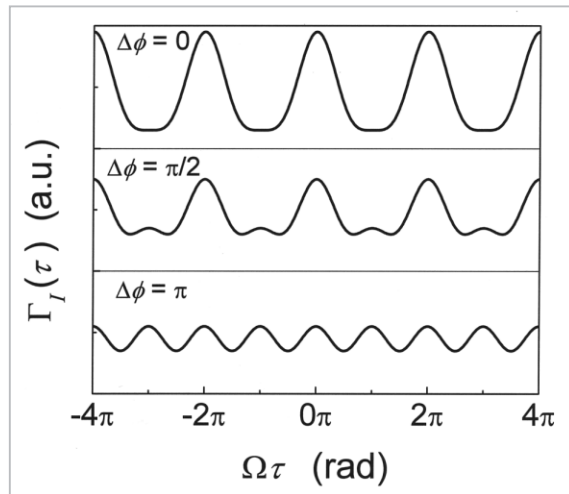


図3 3つのレーザー光によって合成される光パルス列の自己相関波形 ($\gamma = 1$ とした計算結果)

$\Delta\phi$ については本文を参照。

て差し支えない。

図3に、3つのレーザー光の強度がすべて等しいとした場合の幾つかの $\Delta\phi$ に対する自己相関波形の計算結果を示す。自己相関波形は $\Delta\phi$ に対して 2π を周期として波形を変化させるが、位相が同期していなければ(10)中の $\cos \Delta\phi$ の平均値は0になり、自己相関波形はその形状を全く変化させない。逆に、自己相関波形が $\Delta\phi$ に依存して形状を大きく変化させれば、フーリエ合成が正しく行われている証拠となる。 $\Delta\phi = 0$ の場合の自己相関波形の半値全幅 $\Delta\tau$ は、 $\gamma = 1$ としてよい場合は $\Delta\tau = 0.411/f$ であり、実際のパルス幅の1.32倍になる。表1は幾つかの代表的なパルス波形の波形パラメータを比較したものである。この表から、強度の等しいレーザー光をフーリエ合成して得られる光パルスは、矩形型パルスとガウス型パルスの中間的な性質を有することが分かる。

表1 代表的なパルス波形の波形パラメータの比較

Δt は時間波形の、 $\Delta\nu$ はスペクトルの、 $\Delta\tau$ は自己相関波形の半値全幅。

$I(t)$	$\Delta\tau/\Delta t$	$\Delta\nu \cdot \Delta t$
Rectangular	1	1
Fourier synthesized	1.32	0.622
Gaussian	1.41	0.441
sech ²	1.55	0.315
Lorentzian	2	0.221

3 フーリエ合成の実験装置

3.1 波長可変半導体レーザー

実験に使用した波長可変外部共振器型半導体レーザーの構造を図4に示す。レーザー共振器はInGaAsP半導体レーザー素子と開口数0.47のコリメーティングレンズ(L₁)、1200 lines/mmの回折格子(Grating)で構成されるリトロ型の共振器である。1.53 μmを中心とする波長帯で単一モード発振し、典型的な出力は3~3.5 mWである。レーザー素子の回折格子側端面には反射防止膜がコーティングされており、反対側の端面は劈開のままて出力取り出し鏡として機能する。回折格子の回転軸Pは光軸から一定の距離だけ離れた位置に設けてあり、これにより、モードホップなしに100 GHz以上にわたる連続的な周波数可変動作が得られる。動作電流は閾値の約3倍の70 mAとし、レーザー素子の温度は22 °Cに保った。2台の独立なレーザーのビートスペクトルから測定される線幅は音響雑音のために数百kHz以上に広がっているが、音響雑音の影響を取り除いた真の発振線幅は、周波数揺らぎの原因として白色雑音と1/f雑音を仮定した自己遅延ヘテロダイナミクス法[8] - [10]により、17 kHz程度と推定される。

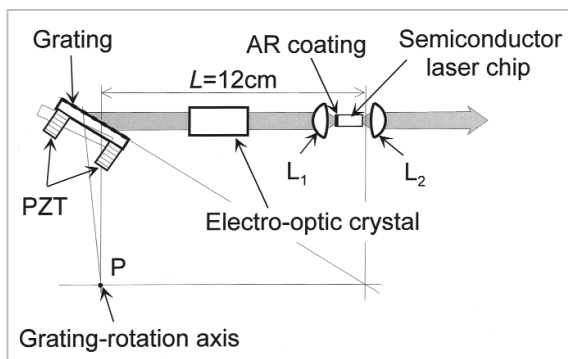


図4 外部共振器型半導体レーザーの構造

発振周波数を負帰還制御するレーザーの回折格子にはピエゾ素子(Piezo-electric transducer, PZT)が取り付けられており、これに与える電圧を変化させることで発振周波数の微調整を行うことができるが、OPLLを構成するためには応答速度が不十分である。そこで、L₁と回折格子の間に置かれた長さ25 mmのLiNbO₃電気光学(electro-optic, EO)結晶を用いて、より広帯域の周波数制

御を行っている。結晶は厚さ6 mmの亚克力板と真鍮板で挟まれ、6本のステンレスねじで強固に締め付けられている。これは結晶の機械的な共振を抑制するための工夫であり、その効果を図5に示す。図5(a)は、拘束のないLiNbO₃結晶を用いて測定された、レーザーの発振周波数の周波数伝達関数であり、振幅と位相の双方に多数の音響学的共振構造が明瞭に認められる。図5(b)は、15 × 10⁶ N/m²の圧力でz軸方向に圧迫し、運動が束縛されたLiNbO₃結晶を用いて測定された周波数伝達関数であり、多数の共振構造はほぼ完全に抑圧されている[11]。3 kHz以下の周波数帯にも目立つ共振構造は存在せず、25 MHzの3 dB帯域幅を持つ平坦な周波数伝達関数が得られたことになり、これは大抵のOPLLにとって十分な帯域である。

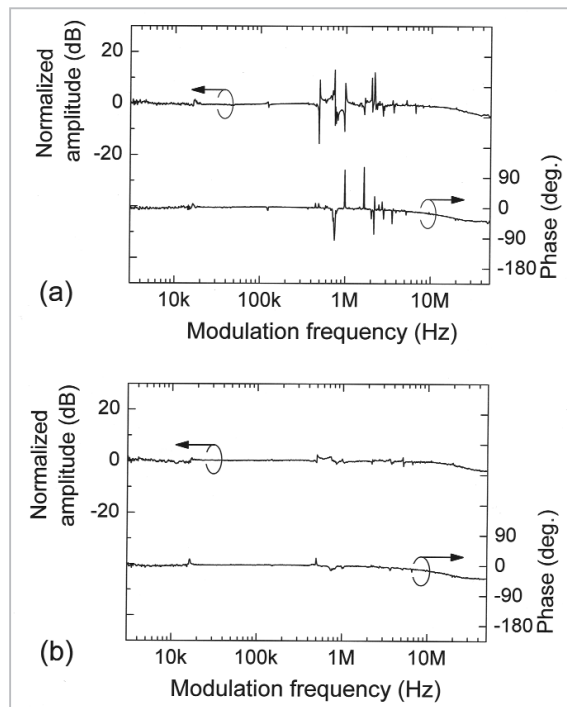


図5 機械的拘束の効果

(a)拘束されていない場合の周波数伝達関数、(b)拘束された場合の周波数伝達関数。

3.2 光位同期ループ(OPLL)

OPLLは、二つのレーザー光の干渉によって得られるビート信号を電氣的に処理し、一方のレーザーの発振周波数に負帰還制御することにより、二つのレーザー光の間の位相差が常に一定の関係を保つように自動制御する技術である。二つの

レーザ光の間に一定の周波数差がある場合をヘテロダインOPLLと呼び、周波数差がなく、位相差が時間的に一定である場合をホモダインOPLLと言う。フーリエ合成に必要なのは后者であるが、精度の良いホモダインOPLLを実現するためには、2つの入力光によるビート信号の検出に工夫が必要である。

一般によく用いられる平衡型検出法は、2つのレーザ光を50:50のビームスプリッタで混合分岐し、2つの出力ポートに特性の等しい光検出器を1つずつ配置し、それらの出力電流の差を位相誤差信号として用いる方法である。比較的簡単な装置構成でビート信号を精密に検出できる利点があるが、一般に2つの光検出器のバランスを精密に維持するのは難しく、同相モード雑音の除去能力は20～30 dB程度であり、フーリエ合成の場合のように2つの入力光の強度差が大きい場合は使用できない。

FMサイドバンドヘテロダイン法は、あらかじめ一方の入力光に数百MHz程度の周波数変調(位相変調で代用する場合が多い)を与えておき、この変調サイドバンドと他方の入力光とのビート信号をヘテロダイン検出し、これを電気的に復調して誤差信号とする方法である。周波数変調の代わりに単側波帯(single sideband, SSB)変調を与えればSSBヘテロダイン法になる。いずれの方法も、変調器の残留AM成分がビート信号の検出限界を与えるが、特にFMサイドバンドヘテロダイン法では、この検出限界は容易に-60dBにも達する。

なお、FMサイドバンドヘテロダイン法でOPLLを構成した場合は、2つの入力光の位相差は0又は π のいずれかしか選択できないが、SSBヘテロダイン法では復調器の直前に移相器を設けることにより、0から 2π の間の任意の位相差を得ることができる。本研究では、必要に応じてFMサイドバンドヘテロダイン法とSSBヘテロダイン法を使い分けている。

精度の良いOPLLを実現するためには、制御ループの伝達関数を決めるループフィルタの最適化も重要である。本研究で用いたOPLLでは、106 Hzをクロスオーバー周波数としてPZTとEO結晶へ位相誤差信号を分配している。PZTを含む制御ループは10 Hz以下の低周波で積分型であ

り、EO結晶を含む制御ループには14 KHzと960 kHzにそれぞれ極と零点を持つ能動ラグ・リードフィルタが使用されている。ループの伝達遅延時間で決まる限界周波数が5 MHz前後になることを考慮し、特性周波数を約1 MHz、減衰率を約0.95としている。

OPLLの精度は、2つのレーザ光によるビート信号の残留位相揺らぎによって評価される。スペクトラムアナライザ等で測定されるビート信号のパワースペクトル密度を搬送波の電力で規格化したものを $L(f)$ とすると、ビート信号の位相揺らぎの実効値は、

$$\sqrt{V_{\Delta\phi}} = \sqrt{2 \int_{f_{low}}^{f_{high}} L(f) df} \quad (12)$$

を計算することによって推定される[12]。ただし、 f はビート信号の中心周波数 f_0 からのオフセット周波数である。ビート信号の周波数が大きくて $L(f)$ を直接測定することができない場合は、OPLLの制御ループ内で観測されるビート信号を用いて間接的に評価することができて、そのビート信号の規格化されたパワースペクトル密度を $L_m(f)$ 、ビート信号に重畳して現れる付加雑音の規格化されたパワースペクトル密度を $S'_{n_s}(f + f_0)$ 、OPLLの閉ループ伝達関数を $H(j2\pi f)$ として、

$$L(f) = L_m(f) - \frac{1}{2} S'_{n_s}(f + f_0) \left(|1 + |1 - H(j2\pi f)|^2 - |H(j2\pi f)|^2 \right) \quad (13)$$

となる[13]。この式を使えば、位相弁別器の特性や局部発振器の雑音レベルに依存せずに位相揺らぎを正確に推定できる。

なお、FMサイドバンド法ではビート信号にキャリアが出現しないため、ビート信号を復調して得られる信号の実効値を測定することになるが、位相弁別器の変換利得や局部発振器の位相雑音スペクトルをあらかじめ測定しておく必要がある。

3.3 四光波混合

高繰り返しのパルス列をフーリエ合成するためには、効率の良いFWMが必要である。FWMは媒質の屈折率が入射光によって変調を受けることで生じ、原理的には3次の非線形性を有する媒質であればどのようなものでもFWM作用を期待できるが、1.5 μm の波長帯では特にSOAが効

率の良いFWM発生器としてよく利用される。半導体利得媒質中での3次の非線形効果は、入射光のビートによってキャリア密度が変調を受け、その結果として屈折率が変調を受ける効果や、ビートによってキャリアの温度に変調が生じ、結果として屈折率変調を生じる効果などが知られている。

図6は本研究で用いたSOAのFWM変換効率を測定した結果である。ALCATEL社製の25dBの利得を持つSOAをFWM素子として選択した。図6(a)は周波数を1.8 THz隔てた2つの異なるレーザー光(λ_2, λ_3)を重ねてSOAに注入した時に得られた出力光のスペクトルであり[14]、等しい周波数差を隔ててストークス光とアンチ・ストークス光が発生している様子が明瞭に分かる。

図6(b)は2つのレーザー光の周波数差の関数としてFWM光の光強度を測定した結果であり、およそ4 THz程度までフーリエ合成に十分な強度の信号が得られている。

なお、フーリエ合成を行うためには位相コヒ

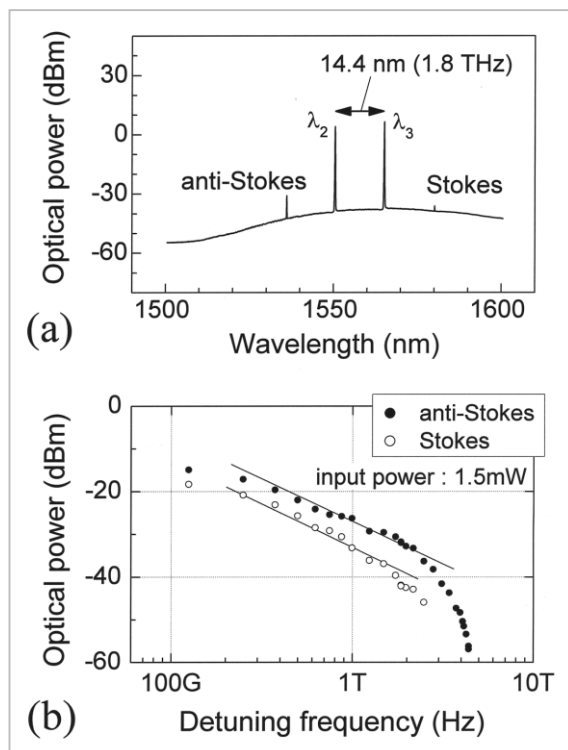


図6 強度の等しい2つの注入光を半導体光増幅器(SOA)へ入射して得られる四光波混合(FWM)

(a)SOA出力光のスペクトル
(b)2つの注入光の周波数差の関数として測定されたFWM光の強度。

ーレントな波長変換が得られればよいので、FWMの代わりに、同一の媒質中で2次の非線形効果が連続して起こるカスケード $\chi^{(2)}$ の効果[15]を利用することも可能であるが、 $\chi^{(2)}$ を利用する場合はFWMに比べて位相整合条件が格段に厳しくなる。

4 フーリエ合成の実験

4.1 1.8THz光パルス列のフーリエ合成

図7にフーリエ合成の実験装置を示す。光源には前節で述べた外部共振器型半導体レーザーが3台用いられており、それらを図中にLaser 1, 2, 3と示した。共振器構造は3台とも同じであるが、Laser 1と2だけが共振器内に電気光学結晶を有している。Laser 2と3の出力はFC3を使って混合分岐され、その出力の一方はFWM光を発生させるためSOA(SOA1)へ導かれる。SOAの出力は光バンドパスフィルタ(BPF)を通してアンチ・ストークス光のみが取り出された後、FC2を通過して帯域1.5 GHzの光検出器(PD1)へ導かれる。一方、FC1を通過したLaser 1の出力光の一方には位相変調器(PM)によって480 MHzの位相変調が付加され、光遅延器(OD)で適当な位相差 $\Delta\phi$ が与えられた後、PD1へと導かれる。PD1はLaser 1からの光とアンチ・ストークス光との間のビート信号を生成し、その出力はDBMで復

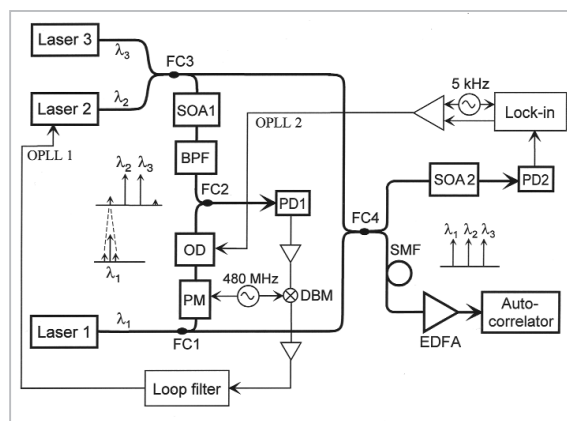


図7 フーリエ合成の実験装置

FC1-FC4は3dBファイバカプラ、SOAは半導体光増幅器、BPFは光バンドパスフィルタ、PMは位相変調器、ODは光遅延器、PD1-PD2は光検出器、SMFは単一モードファイバ、EDFAはエルビウムがドープされたファイバ増幅器、DBMはダブルバランスドミキサ。

調され、ループフィルタで処理される。ループフィルタの出力はLaser 2のEO結晶と、PZTに負帰還され、OPLL (OPLL1)が構成される。3台のレーザの周波数差を1.8 THzに設定したとき、OPLL1の誤差信号から見積もられる $\Delta\phi$ の残留揺らぎは160 mrad ($V_{\Delta\phi} = 0.026 \text{ rad}^2$)であった。FC1とFC3からの残りの出力はFC4で混合され、エルビウムがドープされたファイバ増幅器(EDFA)で増幅された後、30 fsの時間分解能を持つ自己相関計で波形が観測される。この状態でOPLL1を閉じれば、繰り返し周波数が1.8 THzのパルス波形が自己相関計で観測されるが、ファイバに誘導される振動や温度変化のために、パルス波形は数秒間しか持続しない。そこで、FC4で混合された光の一部を別のSOA (SOA2)へ導入してFWM光を発生させ、SOA2からの出力光の強度がパルス波形の変化に応じてわずかに変化することを利用して、この強度変化をロックインアンプで検出し、ODへ負帰還してファイバ長の揺らぎを補償する。この補助的なOPLL (OPLL2)を動作させることにより、波形の安定性が劇的に改善される。また、フーリエ合成される波形が安定であっても、光ファイバやEDFAの波長分散のために、光パルスを数m伝播させただけでも波形が大きく崩れる。そこで、EDFAの直前に適当な長さの単一モードファイバ(SMF)を挿入して、自己相関計において最適なパルス波形が得られるように分散を補償する。なお、光学系はすべて偏波面保持ファイバで構成され、すべてのレーザ光の偏波面が一致するように注意深く調整する。また、図には描かれていないが、ファイバ端からの反射光を完全に除去するために随所に光アイソレータが使用されている。

はじめに3台のレーザの発振周波数差を9.6 GHzに設定して、フーリエ合成される光パルスの波形を観測した。その際、図7の実験装置におけるEDFAと自己相関計の代わりに、帯域が45 GHzの高速光検出器とサンプリングオシロスコープを用いた。図8は観測された光パルスの時間波形である[16]。図1における $\Delta\phi = 0$ の計算結果とよく一致するが、光検出器の感度が9.6 GHzにおいて35%、19.2 GHzにおいて40%低下しているため、波形は完全に零位まで下がり、バック

グラウンドを伴って見える。点線はこの周波数応答を考慮して計算した理論的な波形であり、実験結果をよく再現している。もし光検出器が平坦な周波数特性を有していればバックグラウンドは現れなかったはずである。測定された時間波形は $\Delta\phi$ に対して強い依存性を示し、 $\Delta\phi = 0^\circ$ で望ましいパルス波形が得られたのに対し、 $\Delta\phi = 100^\circ$ でサテライトパルスが目立ち始め、 $\Delta\phi = 180^\circ$ ではもはやサテライトパルスは主パルスと区別がつかず、単に繰り返し周波数が2倍の正弦波になった。これらの波形の特徴は図1に描かれた計算結果とよく一致している。

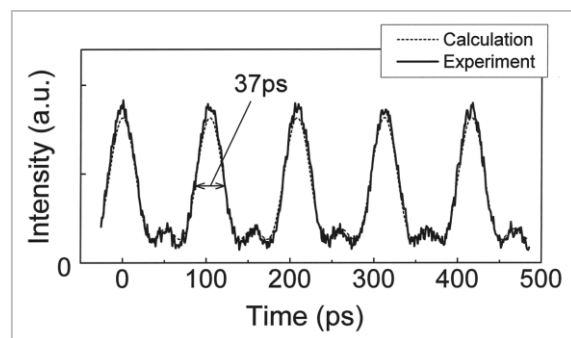


図8 9.6GHzの光パルス波形

次に、3台のレーザの発振周波数差を106 GHz、257 GHz[17]、504 GHz、1.25 THz、1.81 THz[14][18]と順次増加させて光パルスの合成実験を行った。図9は、1.81 THzでの光パルスの合成実験の際にEDFAの出力部で観測された光スペクトルである。3台のレーザは1.81 THzの周波数差を保ち、ほぼ等しい光強度で発振している。1535 nmから1570 nmにかけて背景光レベルが増加しているが、これはEDFAの自然放出光である。図10は、1.81 THzの光パルスの自己相関波形である[14]。(a)は $\Delta\phi = 0$ として得られたものであり、(b)は $\Delta\phi = \pi$ として得られたものである。波線は(11)を使った計算結果であり、実験結果を正しく再現している。本研究におけるパルスの繰り返し周波数はEDFAの帯域幅で制限されているが、OPLL自体は3.75 THzまで十分に機能することを確認した。仮に60 nm程度の広い利得幅が利用できるならば3.75 THzのパルス列が合成できることになり、このような超高速パルス列を従来のモード同期レーザ等で発生させることは極めて困難である。

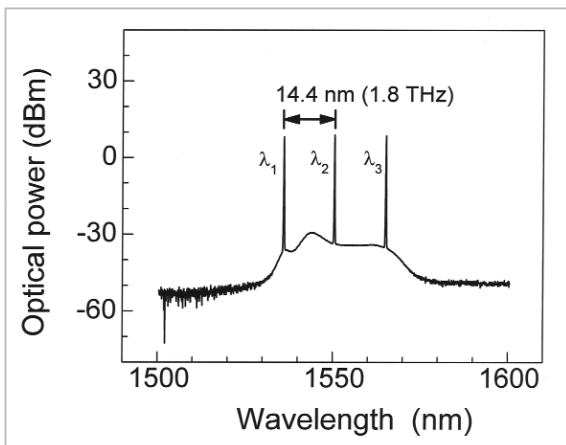


図9 1.8 THzの光パルスのスペクトル

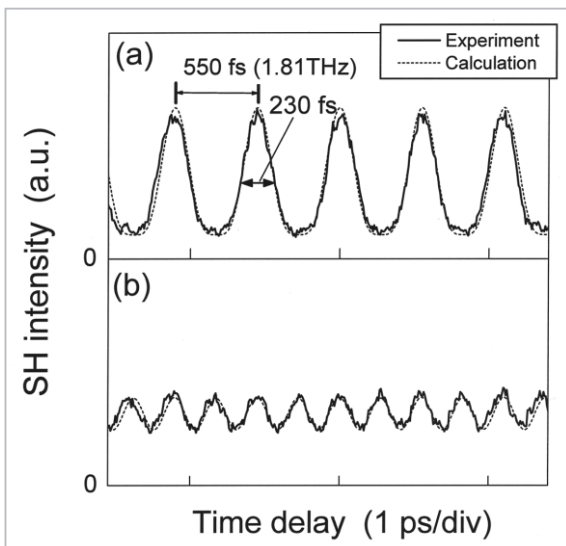


図10 1.81 THzの光パルスの自己相関波形

(a) $\Delta\phi = 0$, (b) $\Delta\phi = \pi$. 実線は実験で得られた波形であり、波線は式(11)を使って計算された波形。

4.2 フーリエ合成された光パルス列の同期実験

前節で合成された光パルス列の繰り返し周波数は、フリーランニングで動作しているレーザの周波数揺らぎを反映して揺らぐ。繰り返し周波数を安定化するためには、合成された高速のパルス列を外部の安定なクロックに同期させるのが最も合理的な手段である。我々は、FWMを利用して高速のパルス列から低速の基本クロックを抽出する手法[19] - [21]に着目し、この原理を用いて、フーリエ合成された高速のパルス列を低速のクロックへ同期する実験を試みた。

図11に光パルスの同期実験の装置構成を示す。前節でパルス合成に用いられた3台のレーザがここでも光源として用いられている。SOA1は

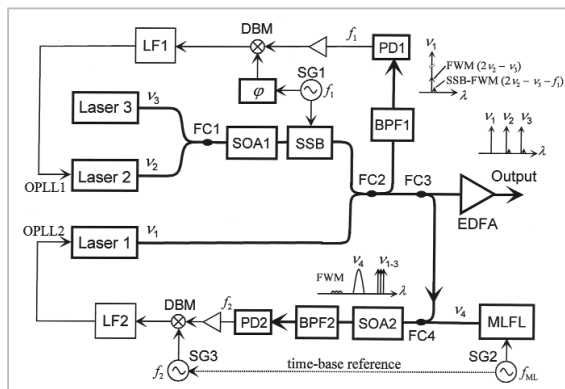


図11 光パルスの同期実験の実験装置

SSBは単側波帯変調器、 ϕ は位相器、MLFLはモード同期ファイバリングレーザ、SG1-SG3は信号発生器。他の記号は図7の説明を参照のこと。

Laser 2と3の出力光からFWM光を発生させる。その出力光は447 MHzで駆動されるSSB変調器へ導入され、周波数のシフトしたFMW光が生成される。SSBに含まれる光パワーはキャリアの光パワーの2%程度である。周波数のシフトしたFWM光とLaser 1からの光によるビート信号はPD1で電気信号に変換され、DBMで復調されてフーリエ合成のための位相誤差信号となる。位相誤差信号はループフィルタ(LF1)で成形され、Laser 2の発振周波数を制御するように負帰還される。SSB変調を行っているため、復調の際に位相差 ϕ を調整することによって、合成される光パルスの位相パラメータ $\Delta\phi$ を任意に設定することが可能であり、図7で用いられた補助的なOPLLは不要である。合成されるパルス列の繰り返し周波数は、OPLL1を動作させた状態でLaser 1か3の発振周波数を掃引することで、波形を維持したまま連続的に変化させることが可能である。フーリエ合成された光パルス列の一部は、FC4を用いてモード同期ファイバレーザ(MLFL)からの光パルスと混合される。MLFLは1547 nmの波長帯で動作し、繰り返し周波数 f_{ML} が8.0027 GHz、パルス幅が9.6 psの安定したクロックパルスを発生させる。2つのパルス列は同時にSOA(SOA2)に導入され、1544 nmのFWM光を発生させる。このFWM光に含まれる光の強度は2つのパルス列の相対的な位相差、すなわちタイミングジッタに強く依存するため、この強度変化を位相誤差信号とするOPLLを構成してLaser 1の発振周波数に負帰還制御すれば、2つのパルス

列を同期させることができる。このOPLLを構成するため、バンドパスフィルタ (BPF2) を用いて SOA2 の出力光から FWM 光だけを取り出し、その強弱の変化を PD2 で電気信号に変換するが、ここで信号対雑音比を向上させるために、 $f_2 = 100$ MHz のヘテロダイン検出を行う。このため、二つのパルス列は 100 MHz の周波数差を持って同期することになる。

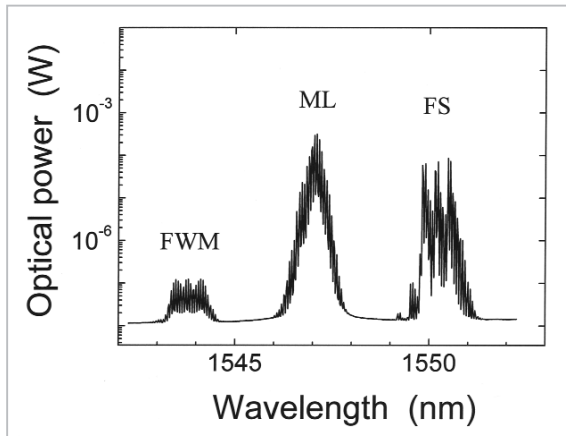


図 12 SOA2 の出力光のスペクトル

FS はフーリエ合成されたパルス、MLFL はモード同期ファイバレーザからのパルス、FWM は四光波混合をそれぞれ表す。

同期が可能なフーリエ合成パルスの繰り返し周波数はクロックパルスのパルス幅できまり、本実験では 40 GHz (パルス幅は約 8 ps) であった。図 12 は SOA2 の出力光のスペクトルを観測した結果である。約 0.1% の変換効率で FWM 光が得られており、8 GHz と 40 GHz の微細な構造は SOA2 内での相互利得変調の効果による。図 13 は、フーリエ合成された光パルス列を光検出器で受光して得られた電気信号のスペクトル [22] であり、パルスの包絡線の基本周波数成分のパワースペクトルに当たる。このスペクトルの純度が高ければ高いほど、パルスの繰り返し周波数が安定していることを示す。破線は OPLL2 が動作していない場合であり、スペクトルはフリーランニングで動作しているレーザの周波数揺らぎを反映して大きく揺らいでいる。実線は OPLL2 が動作している状態であり、40.1135 GHz の周波数に純度の高い信号成分が現れている。この周波数は正確に $5f_{ML} + f_2$ の値に等しく、フーリエ合成パルスがクロックパルスの周波数の 5 倍

に f_2 を加算した周波数に正確に同期していることを示している。図 13 の実線のスペクトルを用いて位相揺らぎを推定すると 109 mrad となり、タイミングジッタに換算して 0.43 ps である。パルスが同期していない場合のタイミングジッタが ns のオーダーであることと比較すると、この改善は劇的といえる。

なお、パルスの同期状態は 1 時間以上にわたって持続させることが可能である。

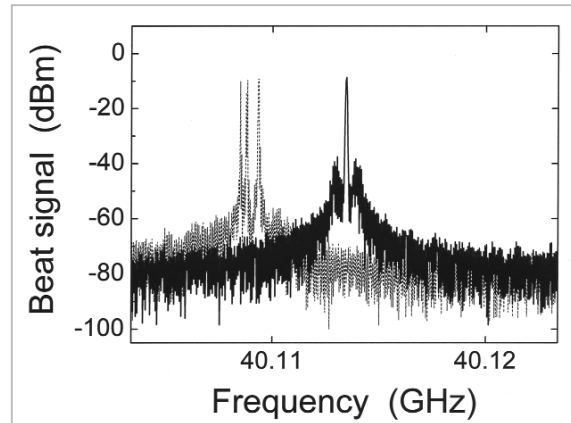


図 13 フーリエ合成された光パルスの電気信号スペクトル

実線はクロックに同期した状態、破線は同期していない状態。RBW は 30kHz。

5 任意波形発生

3 つの独立したレーザ光を使って光パルスを合成する実験について述べたが、より多くのレーザ光を用いれば任意波形の合成が可能になる。図 14 (a) は 9 個のレーザ光を使って 8 ビットの任意ビット列を合成する例として、「0」と「1」の並びが {01100111} となるビット列を合成する様子を示している [23]。左側の図は各レーザ光の振幅と位相を表し、右側の図は合成される光の時間波形を示している。各々のビットはチャープを持たず、ビット同士の間で光強度がゼロになる RZ パルスである。ビットパターンをダイナミックに変化させることは難しいが、同一のビットパターンを繰り返し用いるルーティングシステムなどにおいて有用と考えられる。図 14 (b) は、ダークパルス列を合成する例である。このパルス列は、ダークソリトンの励起に欠かせない重要な特性として、パルスの先端で光の位相が大きい

く変化する特性を備えている。現在までのところ、フーリエ合成以外の方法でこのようなダークパルス列を発生させることは困難である。

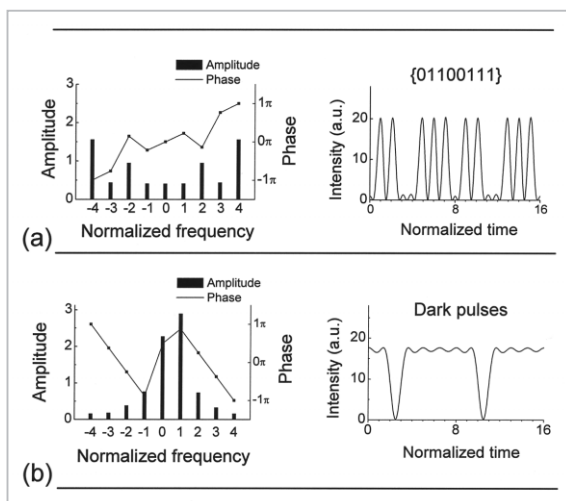


図 14 任意波形発生シミュレーション
(a)任意ビット列、(b)ダークパルス列

6 まとめ

我々は、従来の方法では実現が困難と考えられる超高速の光パルス列を発生させるため、フーリエ合成という手法に注目し、独立した複数のレーザ光を重ね合わせて超高速のパルス列を

安定に発生させることのできる技術を開発した。その結果、 $1.5 \mu\text{m}$ の波長帯で発振する3台の半導体レーザを光源として用い、繰り返し周波数が9.6 GHzから1.8 THzまでの任意の値を持つ超高速の光パルス列の合成に成功した。また、合成されたパルス列は、外部の安定なクロックパルスと容易に同期させることが可能であり、それによって繰り返し周波数の安定度が格段に向上することを示した。また、フーリエ合成の任意波形発生機能の例として、任意ビット列とダークパルス列の合成法を提案した。

フーリエ合成の考え方は、フェムト秒からアト秒の超短光パルスが発生させるためにも応用されており、その汎用性・実用性が実証されつつある。一般に、1台の超高性能な装置を開発するよりも、高性能な装置を多数並列に組み合わせる方が簡単に優れた能力が得られることが多く、フーリエ合成もその例外ではない。本研究では光通信用光源への応用という観点から超高速のパルス列を発生させることに主眼を置いたが、フーリエ合成の光源としてモード同期レーザを用いれば、パルスの時間幅を容易に短縮させることもできるはずであり、今後の研究動向が注目される。

参考文献

- 1 S. Kawanishi, "Ultra-high-speed optical time-division-multiplexed transmission technology based on optical signal processing", *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 34, No. 11, pp. 2064-2079, 1998.
- 2 S. Arahira, S. Oshiba, Y. Matsui, T. Kunii, and Y. Ogawa, "Terahertz-rate optical pulse generation from a passively mode-locked semiconductor laser diode", *Opt. Lett.*, Vol. 19, No. 11, pp. 834-836, 1994.
- 3 E. Yamada, E. Yoshida, T. Kitoh, and M. Nakazawa, "Generation of terabit per second optical data pulse train", *Electron. Lett.*, Vol. 31, No. 16, pp. 1342-1344, 1995.
- 4 C.L. Hayes, and L.M. Laughman, "Generation of coherent optical pulses", *Appl. Opt.*, Vol. 16, No. 2, pp. 263-264, 1977.
- 5 T. Mukai, R. Wynands, and T.W. Hänsch, "Optical pulse synthesis with three cw semiconductor lasers using nonlinear phase-locking", *Opt. Commun.*, Vol. 95, No. 1,2,3, pp. 71-76, 1993.
- 6 A. D'Ottavi, F. Martelli, P. Spano, A. Mecozzi, S. Scotti, R. Dall'Ara, J. Eckner, and G. Guekos, "Very high efficiency four-wave mixing in a single semiconductor traveling-wave amplifier", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 68, No. 16, pp. 2186-2188, 1996.
- 7 D.S. Elliott, R. Roy, and S.J. Smith, "Extracavity laser band-shape and bandwidth modification", *Phys. Rev. A*, Vol. 26, No. 1, pp. 12-18, 1982.
- 8 T. Okoshi, K. Kikuchi, and A. Nakayama, "Novel method for high resolution measurement of laser output

- spectrum", *Electron. Lett.*, Vol. 16, No. 16, pp. 630-631, 1980.
- 9 L.B. Mercer, "1/f frequency noise effects on self-heterodyne linewidth measurements", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 9, No. 4, pp. 485-493, 1991.
 - 10 H. Ludvigsen, M. Tossavainen, and M. Kaivola, "Laser linewidth measurements using self-homodyne detection with short delay", *Opt. Commun.*, Vol. 155, pp. 180-186, 1998.
 - 11 M. Hyodo, K.S. Abedin, and N. Onodera, "Generation of millimeter-wave signals up to 70.5 GHz by heterodyning of two extended-cavity semiconductor lasers with an intracavity electro-optic crystal", *Opt. Commun.*, Vol. 171, No. 1-3, pp. 159-169, 1999.
 - 12 D. von der Linde, "Characterization of the noise in continuously operating mode-locked lasers", *Appl. Phys. B*, Vol. 39, pp. 201-217, 1986.
 - 13 M. Hyodo, and M. Watanabe, "A novel technique for optical generation of millimeter-wave signals using multiple phase-locked lasers", *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E86-C, No. 7, pp. 1236-1244, 2003.
 - 14 M. Hyodo, K.S. Abedin, and N. Onodera, "Fourier synthesis of 1.8-THz optical-pulse trains by phase-locking of three independent semiconductor lasers", *Opt. Lett.*, Vol. 26, No. 6, pp. 340-342, 2001.
 - 15 兵頭政春, 谷正彦, 小野寺紀明, 阪井清美, "2モード発振マイクロチップレーザーによる狭帯域ミリ波発生", *レーザー研究*, Vol. 26, No. 12, pp. 871-875, 1998.
 - 16 M. Hyodo, N. Onodera, and K.S. Abedin, "Fourier synthesis of 9.6-GHz optical-pulse trains by phase locking of three continuous-wave semiconductor lasers", *Opt. Lett.*, Vol. 24, No. 5, pp. 303-305, 1999.
 - 17 M. Hyodo, N. Onodera, and K.S. Abedin, "Fourier synthesis of 257-GHz optical-pulse train by phase locking of three continuous-wave semiconductor lasers", *Electron. Lett.*, Vol.35, No.7, pp. 564-566, 1999.
 - 18 M. Hyodo, K.S. Abedin, N. Onodera, K.K. Gupta, and M. Watanabe, "Fourier synthesis of stable ultrafast optical-pulse trains using three lasers and an SOA", *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E85-C, No. 1, pp. 165-166, 2002.
 - 19 T. Saito, Y. Yano, and N. Henmi, "Optical TDM 20 Gb/s-105 km transmission employing newly proposed optical PLL timing extraction", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 6, No. 4, pp. 555-557, 1994.
 - 20 O. Kamatani, S. Kawanishi, and M. Saruwatari, "Prescaled 6.3 GHz clock recovery from 50 Gbit/s TDM optical signal with 50 GHz PLL using four-wave mixing in a travelling-wave laser diode optical amplifier", *Electron. Lett.*, Vol. 30, No. 10, pp. 807-809, 1994.
 - 21 O. Kamatani and S. Kawanishi, "Prescaled timing extraction from 400 Gb/s optical signal using a phase lock loop based on four-wave-mixing in a laser diode amplifier", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 8, No. 8, pp. 1094-1096, 1996.
 - 22 M. Hyodo, K.S. Abedin, N. Onodera, and M. Watanabe, "Harmonic synchronization of Fourier-synthesized optical pulses to an external optical clock", to appear in the *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 15, 2004.
 - 23 M. Hyodo, K.S. Abedin, and N. Onodera, "Generation of arbitrary optical waveforms by Fourier synthesis using three continuous-wave semiconductor lasers", *Electron. Lett.*, Vol. 36, No. 3, pp. 224-225, 2000.



ひょうどう まさはる
兵頭政春

基礎先端部門レーザー新機能グループ
主任研究員 博士(工学)
量子エレクトロニクス、ミリ波フォ
トニクス、原子光学



カジ・サルワル・アベディン
(Kazi Sarwar ABEDIN)

情報通信部門超高速フォトニックネッ
トワークグループ主任研究員 博士
(工学)
光通信、短光パルス発生、非線形光学、
波長変換、光ソリトン、光計測



わたなべ まし
渡辺昌良

基礎先端部門研究センター主管 工学
博士
レーザー工学、原子光学

おの でのりあき
小野寺紀明

防衛大学校電気情報学群通信工学科助
教授 工学博士
光通信

