

研究速報

ビートを利用する超短光パルス列の発生

平野 育

計量研究所大阪計測システムセンター 〒530 大阪市北区扇町 2-6-20

(1991年10月28日受付, 1992年2月17日受理)

Generation of Ultrashort Pulses Using Beats

Iku HIRANO

National Research Laboratory of Metrology, Osaka Measurement System Center,
2-6-20, Ougi-machi, Kita-ku, Osaka 530

(Received October 28, 1991; Accepted February 17, 1992)

Generation of ultrashort optical pulses using beats is proposed. It is shown by a computer simulation that continuous trains of ultrashort optical pulses are generated in approximate forms with a synthesis of lasers. It may be possible to generate optical pulses shorter than 1 fs with repetition rate of 178 THz.

1. はじめに

光パルスの幅は、Qスイッチ法、モード同期法、各種光パルス圧縮技術などレーザー制御技術の進歩と共にナノ秒からピコ秒、フェムト秒へと短縮され、1987年には6 fsの光パルスが報告されるに至った¹⁾。このような短パルスは、超高速現象の解明や高速光情報処理デバイスの開発などに大きく貢献している。

一般に知られているモード同期法は、異なる周波数成分の位相同期を行わせるために、非線形効果を用いてモード結合を行っている。受動モード同期では可飽和吸収体が、強制モード同期では変調器が非線形素子として使われている。また、レーザー媒質自身もその役割を担っている場合がある²⁾。

現在までに、CPM法とパルス圧縮法を組合せることにより6 fsの超短光パルスが得られている¹⁾。CPM法は、色素レーザーから発生するパルス列を3角形のリング共振器のなかで右回りと左回りに回転させ、共振器内で利得媒質から共振器長の1/4倍のところに置かれた可飽和吸収体のなかで両パルスを衝突させ、光パルスを短くし両パルスを同期させ安定にする方法である³⁾。さらに負の分散が作れるプリズム対を共振器内部に挿入することにより位相補償を行い⁴⁾ 27 fsの超短光パルスを

得ている⁵⁾。このほか、2stacking誘電体多層膜をコーティングした鏡を共振器鏡自身として用いる方法^{6,7)}、Gires-Tournois干渉計対を挿入する方法^{8,9)}がある。これにより得られた光パルスを増幅し、光ファイバーに導き自己位相変調効果によりスペクトルを広げ、回折格子対により圧縮する¹⁰⁾。さらに、2次や3次の分散の補償をするため、パルスが4個のプリズムの頂角付近を通過するようにしている¹¹⁾。

これに対し、フーリエ変換光学系を構成しパルス波形整形やパルス合成を行う光パルスシンセサイザーも盛んに研究されている。これは、短パルス光を回折格子で周波数分散して、電子制御可能な液晶位相変調器¹¹⁾や非線形物質の動的回折格子¹²⁾などの空間フィルターを用いて周波数領域で位相と強度をリアルタイムでコーディングし、再び回折格子で波形合成をして波形制御を行い、新たな短パルス光の合成を行う方法である。また、電気光学変調器でテラヘルツ程度のサイドバンドを生成し周波数成分の制御に変調器アレイを用いれば、プログラマブルなテラビットワード生成器も構成可能になると考えられている^{13,14)}。さらに、短光パルスや二つの異なる周波数の光を光ファイバーに入力伝送させ、変調不安定を用いればテラヘルツ間隔のサイドバンドが得られフェムト秒幅、10 THz繰返しの超高速光パルス列生成も可能と

考えられている^{13,14}。これらは、レーザーには直接手を触れず、その出力を外部で制御することを特徴としている。そして、将来の光シンセサイザー実現に向けて、光位相同期ループも実現されている¹⁵。ビートを利用し光パルスを発生させる技術は、周波数と位相を制御した5個までの炭酸ガスレーザーを使用し、半値全幅 1.6 ns 繰り返し 120 MHz という成果が得られている¹⁶。

本稿では、上述のような波形合成の考え方をもとに、ビートを利用する超短光パルス列の発生法を提案する。

2. 理 論

ある光波の電界を

$$E_n(t) = A_n \sin \{ (1 + \delta_n) \omega t + \phi_n \} \quad (1)$$

と表現する。

いま、角周波数 ω の変化の割合を $\delta_n = 0.01 \times n$ とし、位相 $\phi_n = 0$ とする。ここで、 $k+1$ 個の光波の合成を考え、その強度波形

$$\left\{ \sum_{n=0}^k E_n(t) \right\}^2 \quad (2)$$

を描いてみる。

簡単のため、振幅 A_n を一定値、 $C, f = 445.000$ THz, とした場合について k の値を1から5まで変化させた様子を Fig. 1 に示す。(2)式は、

$$[C \sin \{ (1 + \delta_k/2) \omega t \} \sin \{ \pi(k+1)\delta f t \} / \sin(\pi \delta f t)]^2 \quad (3)$$

と変形でき、よって包絡線の波形は、

$$C^2 [\sin \{ \pi(k+1)\delta f t \} / \sin(\pi \delta f t)]^2 \quad (4)$$

となる。ここで、 $\delta = \delta_n/n$ である。

k の値を増加させると、パルスの相対強度が増加し半値全幅も短くなり急峻になる。パルスのピーク周期は、この場合 $1/0.01 f = 224.719$ fs になり一定である。パルス間隔を広げるには δ を小さくすればよい。

本方法はビートを利用しているので、パルスを明瞭にするためには、Fig. 1 からわかるように光波を5以上にするのが理想である。パルス幅を決定する要因は二つある。まず、ビートの周期である。Fig. 1 の4に相当する五つの光を用いた場合、パルスの半値全幅はビート周期の約 0.17 倍になる。ビート周期は、各光波の周波数差に反比例する。次に、重ね合わせる光波の数である。光波の数が増せば、パルス幅は短くなる。よって、基本波の周波数を高く設定し、周波数間隔をある程度広げればパルス幅は短くなることになるが、可視光線を使用している限りにおいて、周波数間隔を広げれば、利用できる光波数が減少する。

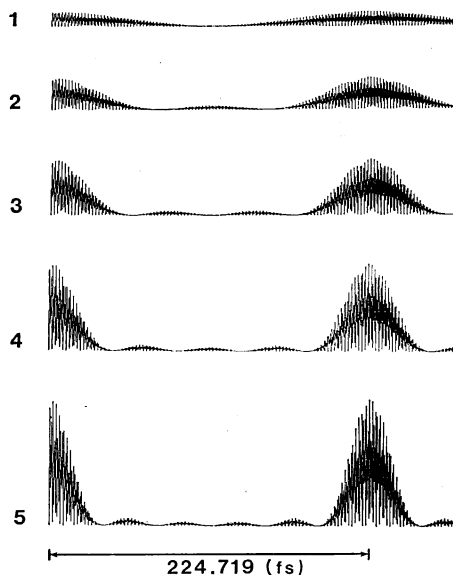


Fig. 1 Calculated intensity traces of beats. The numbers 1 to 5 represent number of light waves that are added to a basic frequency wave.

Fig. 2 のAは、(1)式で $\phi_n = \pi/2$, $f = 445.000$ THz, $\delta_n = 0.1 \times n$ とし、(2)式で $k=6$ とした場合に計算したパルス列の波形である。この場合、445~712 THz の可視光線の帯域を使用し、半値全幅約 4 fs のパルスが繰り返し 44.5 THz で実現されることになる。Fig. 2 のBは、さらに赤外域まで周波数帯域を拡大した場合について、(1)式で $\phi_n = \pi/2$, $f = 178.000$ THz, $\delta_n = 0.5 \times n$ とし、(2)式で $k=6$ とした場合に計算した光パルス列の波形である。178~712 THz の帯域を使用し、半値全幅約 2 fs の超短光パルスが繰り返し 89 THz で実現されることになる。Fig. 2 のCは、(1)式で $\phi_n = \pi/2$, $f =$

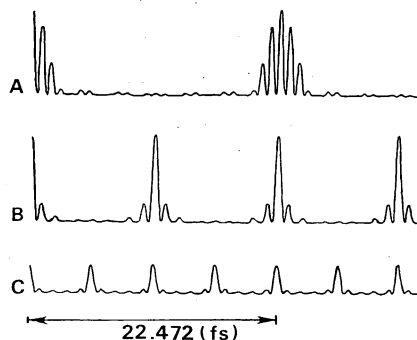


Fig. 2 Calculated intensity traces of beats in wider frequency bands. A: Frequency band of 445-712 THz, B: Frequency band of 178-712 THz. Both A and B are traces for syntheses of 7 waves, and C is for synthesis of 4 waves.

178,000 THz, $\delta_n = n$ とし, (2)式で $k=3$ とした場合に計算した光パルス列の波形である. 178~712 THz の帯域を使用し, 半値全幅約 0.5 fs の超短光パルスが繰返し 178 THz で実現されることになる. 以上, 簡単のため, 振幅 A_n を一定値 C としたが, スペクトル強度分布を適当な山形に設定するとパルス間の電界強度が減少し, より明瞭なパルス列が得られる.

3. 実現方法の検討

本方法を実現するには光源の選定およびモード同期が主な課題と考えられる. 使用する光源は中心周波数が安定していることが必要である. 種類の違う複数の光源を使用し周波数帯域を広げることも考えられるが, ここでは最近, 制御技術がめざましく進歩し, また短波長域で発振する素子が次々と開発されている半導体レーザーを使用することを検討する.

フリー・ランニング動作の半導体レーザーは位相雑音が大きいため位相同期が難しいが, 光掃還による安定化半導体レーザー¹⁵⁾や電氣的負帰還制御¹⁷⁾を用いて非常に高性能のレーザーシステムが構成されている. この手法を用いて, コヒーレント光源の一つの理想的な形態として, 周波数揺らぎの少ない光スイープジェネレータが実現されている¹⁷⁾. この高精度の光スイープジェネレータの将来予想値として, 発振スペクトル中心周波数の安定化 1×10^{-15} , 発振スペクトル中心周波数の確度向上 1×10^{-10} , 発振スペクトル幅狭窄化 50 mHz, 周波数追従 1×10^{-17} という値が算出されている^{18,19)}. 電氣的負帰還を用いたスイープジェネレータは一連の電氣的, 光学的素子の一部分は半導体レーザーとともに集積化可能と考えられている¹⁷⁾. また, cavity quantum electrodynamics を利用し自然放出光を制御することも試みられている²⁰⁾.

ビートを利用する超短光パルス列を発生する光学系を, 既に実現している高性能レーザーシステムを拡張することにより考える. 構想の概略図を Fig. 3 に示す. 各オフセットレーザーシステム中のレーザー発振周波数と基準レーザーシステムのレーザー発振周波数の差は, 適当な周波数の整数倍に順次設定される. 基準レーザーと各オフセットレーザーの出力はビームスプリッターで結合し一つのビームを形成する.

光源については, 現在, 630 nm 帯から 1,570 nm 帯の半導体レーザーが開発されているが, この範囲ではパルス幅数フェムト秒の超短光パルス列の合成が可能と考えられる. さらに, 半導体レーザーの短波長化はパルス電流注入のもとで 490 nm まで到達しており²¹⁾, 波長変

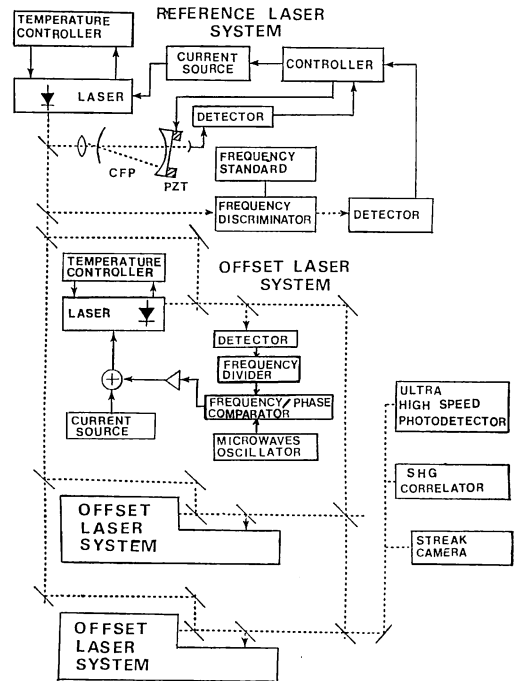


Fig. 3 A planned setup of the ultrashort optical pulse generating system.

換, 他のレーザー光源の使用等により利用できる周波数帯域が増えれば, さらに短いパルス列の生成が可能になるものと考えられる. 各オフセットレーザーシステム中のビート信号検出器については, 非線形結晶による差周波数発生と狭帯域光電素子の使用, あるいは, W-Ni 点接触ダイオードの使用, 光出力を取り出さないオフセットレーザーシステムをシステム間に多数挿入し, ビート周波数を下げることで等による問題解決が考えられる.

4. む す び

ビートを利用することによる, 超短光パルス列の発生について提案した. 光パルス波形の時間依存性と周波数依存性は, フーリエ変換で関係づけられている. 本方法は, 周波数間隔が等しい複数の光源を利用することで周波数帯域を広げ超短光パルスを実現しようとしている. 高次分散や非線形チャープの補償等, 解決してゆく問題はあがあるが, 超短光パルス発生の一方法として有望であると考えられる.

文 献

- 1) R. L. Fork, C. H. Brito Cruz, P. C. Becker and C. V. Shank: "Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation," Opt. Lett., **12** (1987) 483-485.

- 2) 矢島達夫: 超高速光技術, 矢島達夫編 (丸善株式会社, 1990) p. 12.
- 3) R.L. Fork, B.I. Greene and C.V. Shank: "Generation of optical pulses shorter than 0.1 psec by colliding pulse mode locking," *Appl. Phys. Lett.*, **38** (1981) 671-672.
- 4) R.L. Fork, O.E. Martinez and J.P. Gordon: "Negative dispersion using pairs of prisms," *Opt. Lett.*, **9** (1984) 150-152.
- 5) J.A. Valdmanis, R.L. Fork and J.P. Gordon: "Generation of optical pulses as short as 27 femtoseconds directly from a laser balancing self-phase modulation, group-velocity dispersion, saturable absorption, and saturable gain," *Opt. Lett.*, **10** (1985) 131-133.
- 6) M. Yamashita, S. Kaga, K. Torizuka and T. Sato: *Ultrafast Phenomina*, eds. T. Yajima, K. Yoshihara, C.B. Harris and S. Shinoya (Springer-Verlag, 1989) p. 37.
- 7) M. Yamashita, M. Ishikawa, K. Torizuka and T. Sato: *Opt. Lett.*, **11** (1986) 182.
- 8) J. Kuhl and J. Heppner: "Compression of Femtosecond optical pulses with dielectric multilayer interferometers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-22** (1986) 182.
- 9) J. Heppner and J. Kuhl: "Intracavity chirp compensation in a colliding pulse mode-locked laser using thin-film interferometers," *Appl. Phys. Lett.*, **47** (1985) 453-455.
- 10) E.B. Tracy: "Optical pulse compression with diffraction gratings," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-5** (1969) 454-458.
- 11) A.M. Weiner, D.E. Leaird, J.S. Patel and J.R. Wullert: "Programmable femtosecond pulse shaping by use of a multielement liquid-crystal phase modulator," *Opt. Lett.*, **15** (1990) 326-348.
- 12) K. Ema: "Real-time ultrashort pulse shaping and pulse-shape measurement using a dynamic grating," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30** (1991) 2046-2049.
- 13) 小林哲郎: 超高速光技術, 矢島達夫編 (丸善株式会社, 1990) p. 40.
- 14) T. Kobayashi, A. Morimoto, M. Doi, B. Y. Lee and T. Sueta: *Ultrafast Phenomena VI* (Springer-Verlag, 1988) p. 135.
- 15) 申 哲浩, 大津元一: "半導体レーザーの位相同期及び周波数制御", レーザ・原子発振器と極限光子光学シンポジウム (応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会/東京工業大学, 1990) pp. 78-79.
- 16) C.L. Hayes and L.M. Laughman: "Generation of coherent optical pulses," *Appl. Opt.*, **16** (1977) 263-264.
- 17) 大津元一: コヒーレント光量子工学 (朝倉書店, 1990) pp. 108-117.
- 18) M. Ohtsu: *Proc. the 7th Int. Conf. Integrated Optics and Optical Fiber Communication* (IOOC '89, Kobe, 1989) 19A3-1.
- 19) 楠澤英夫, 池上英次, 中川賢一, 大津元一: "半導体光スライプジェネレータ用の有機非線形導波路 II (周波数掃引)", 第50回応用物理学会学術講演会 (1989) 28 pZP 17.
- 20) S. Haroche and D. Kleppner: "Cavity quantum electrodynamics," *Phys. Today*, **Jan.** (1989) 24-30.
- 21) M.A. Haase, J. Qiu, J.M. DePuydt and H. Cheng: "Blue-green laser diodes," *Appl. Phys. Lett.*, **59** (1991) 1272-1274.