

キャリアエンベロープ位相安定化モノサイクル光の発生

山根 啓作・山下 幹雄

Generation of Carrier-Envelope-Phase Stabilized Monocycle Optical Pulses

Keisaku YAMANE and Mikio YAMASHITA

We report our recent work about carrier-envelope-phase (CEP) stabilized ultrashort-optical pulses in the monocycle region. Optical pulses from a laser amplifier system stabilized by the use of home-made CEP locking system were guided into an argon-filled hollow fiber, and broadened by self phase modulation. The spectral phase of generated pulses with an over-one-octave ultrabroad-band spectrum (470–1060 nm) was compensated almost completely using a feedback phase compensation system which consists of the modified SPIDER apparatus and the 4- f phase compensator. Consequently, 3.3-fs, 1.7-cycle CEP stabilized optical pulses in the monocycle region were generated.

Key words: carrier envelope phase, monocycle optical pulse, hollow fiber, phase compensation, spectral interferometry

近年、極短光パルス発生技術の発展は目覚しく、Ti:sapphire レーザー発振器単体ですら 5 fs の光パルス発生が報告されている。筆者らの研究グループでも、460～1060 nm という 1 オクターブを超える超広帯域な光パルスを発生させ、その位相を制御することにより 2.8 fs, 1.5 サイクルの光パルスの発生に成功している^{1,2)}。

このようなモノサイクル、すなわち光パルスの強度時間波形の半値幅が光電場搬送波の振動周期と同じになるような極限的な光波においては、もはやいわゆる光波の強度時間波形というものが、正しく光パルスを記述すると考えるのは困難である。そもそも包絡波というのは、光波の外形が内部の電場の振動に比べてゆっくりとした変化をする場合に定義されうるものであって、モノサイクル域の光波においては適当な概念ではなく、光電場をもって光波を記述することが望ましい。

しかしながら、光電場そのものの決定は現時点では難しく*、さらにそもそも強度やスペクトル形状が高安定な光源であったとしても、パルス列内のおおのこの光パルス電場が全く同じとはなっていないのが実状である。これはたとえ強度時間波形が同じであったとしても、一般にいわれるキャリアエンベロープ位相 (carrier envelope phase,

以下 CEP) がパルス間で変化するためである。近年注目されている高次高調波発生などの非線形現象⁴⁻⁶⁾については、パルスの強度時間波形ではなく電場そのものが本質的な役割を果たし、それゆえ CEP の安定化が有効であるとされている。特に筆者らが発生に成功しているモノサイクル域のパルスでは、こうした非線形現象における CEP 依存性が顕著になると期待され、筆者らはモノサイクル域光パルスの CEP 安定化の実験を進めている。

1. CEP 安定化モノサイクル域光パルス

極短光パルスを発生させるためには、時間とスペクトルの不確定性の関係からわかるようにまず超広帯域光パルス発生が必要であり、次いでそのスペクトル位相計測、そのデータに基づいたスペクトル位相補償を行うことが必要である。特にモノサイクル域の極短光パルス発生にあたっては、帯域に関して“1 オクターブ以上”というのが実際の目安となっている。

超広帯域光パルスを発生させるためには物質の非線形光学現象である自己位相変調効果が広く用いられるが、光波の閉じ込め効果ゆえに効率よく非線形光学効果が得られる光ファイバーが広く使用されている。従来用いられてきたシングルモード光ファイバーに加えて、最近ではフォトニ

北海道大学大学院工学研究科応用物理学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目) E-mail: k-yamane@eng.hokudai.ac.jp

* 技術的な困難はあるものの、すでに実験的に確認されている。文献 3 を参照されたい。

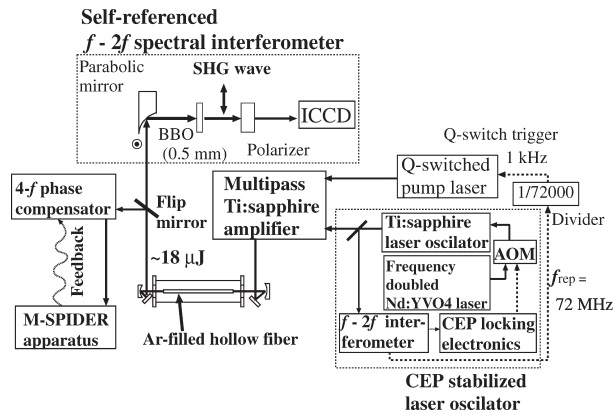


図1 CEP安定化モノサイクル域光発生実験系。実線の矢印は光波の伝搬を、点線の矢印は電気信号の伝達を表す。

ッククリスタルファイバーなどが超広帯域光発生に使用されるが、出射光スペクトルの複雑さや位相のゆらぎなどの問題点に加えて、何より破壊閾値が低いという欠点がある。これらのガラスファイバーを用いて、高次高調波発生などに必要な $\mu\text{J}\sim\text{mJ}$ レベルのパルスエネルギーを有する光パルスの発生を行うことはほぼ不可能である。1オクターブを超える帯域を有する高強度パルスの発生という点では、高強度の入力に耐え高出力が得られる希ガス充填中空ファイバー⁷⁾が現時点では最も有効であり、筆者らの実験では400~1100 nm程度の1オクターブを超える高強度超広帯域光パルスが得られている。このような1オクターブを超えるようなスペクトルを有する光波の特性計測・制御は、原理上の問題もしくは素子の制限から現在でも非常に困難であるが、筆者らは独自に開発した高感度変形SPIDER法および液晶位相変調器を用いた4-f位相変調器を、1オクターブを超える光波に対応できるよう改良し、計測・制御に使用している^{8,9)}。

図1に実験に使用したシステムを示す。まず全チャープミラー補償型Ti:sapphireレーザー発振器からの出力(繰り返し周波数: $f_{\text{rep}}=72\text{ MHz}$, 平均パワー: 320 mW, パルス幅: 12 fs)はビームスプリッターで2:1に分岐される。分岐された $\sim 100\text{ mW}$ の出力光はTi:sapphireレーザー増幅器に入射されて増幅され、残りの出力はf-2f光学干渉計に入射され、 f_{CEO} 信号の検知および安定化に使用される。発振器のCEPの制御方法としてはいくつか存在するが¹⁰⁾、筆者らは発振器の励起光(Spectra Physics社Millenia V)の強度を音響光学素子を用いてわずかに変調する方式をとった。実際には、f-2f光学干渉計において検知された f_{CEO} 信号がレーザーの繰り返し周波数 f_{rep} の4分の1に等しくなるようにフィードバック制御を行っている。発振器から分岐されたもう一方の光波はマルチパ

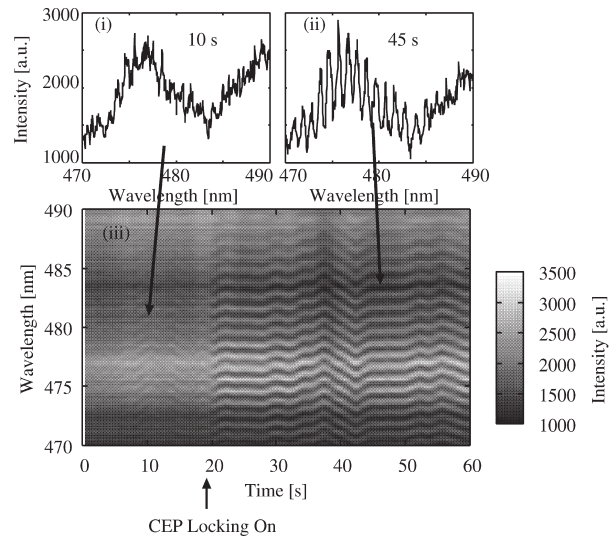


図2 f-2fスペクトル干渉の計測。(i) CEP安定化前(測定開始から10秒後)、(ii) CEP安定化後(測定開始から45秒後)、(iii) 干渉波形の時系列表示。すべて1回の測定における露光時間は0.2秒とした。

スTi:sapphire増幅器に入射されるが、発振器の繰り返し周波数を72000で分周した信号をトリガーとする増幅器励起用Nd:YLF Q-switchレーザー第二高調波光によって増幅される。増幅された光パルスのパルス幅は30 fs, 繰り返し周波数は1 kHz, パルスエネルギーは600 μJ , 中心周波数は790 nmであった。

レーザー増幅器からの出力のうち100 μJ は、3気圧のアルゴンガスを充填したチャンバー中に置かれた中空ファイバー(コア径: 100 μm , 長さ: 32 cm)に入射した。アルゴンガスにおける自己位相変調効果によって1オクターブ以上に広帯域化(470~1060 nm)された光パルスをf-2f自己参照スペクトル干渉計¹¹⁾に入射し、CEPゆらぎの計測を行った。入射光のスペクトルが1オクターブを超えているため、長波長成分の第二高調波と短波長成分が重なって干渉を起こす周波数領域が存在する。分光器を用いて2成分の重なる周波数領域のみを時間的に積算して計測した結果を図2に示す。ただし、各ショットの積算時間は0.2秒で計測は0.5秒間隔とした。CEPを安定化する前はCEPゆらぎのために干渉縞が打ち消しあってしまうが、CEPを安定化すると干渉縞が消えずに残る。図2からわかるように、発振器のCEP安定化装置の動作をオンにすると、干渉縞が現れレーザーの増幅器出力のCEPの安定化も達成されていることが確認できた。また、干渉縞には秒オーダーのゆっくりとしたゆらぎが残っているが、これはビームポインティングのゆらぎや発振器におけるCEP制御の誤差などに起因すると考えている。

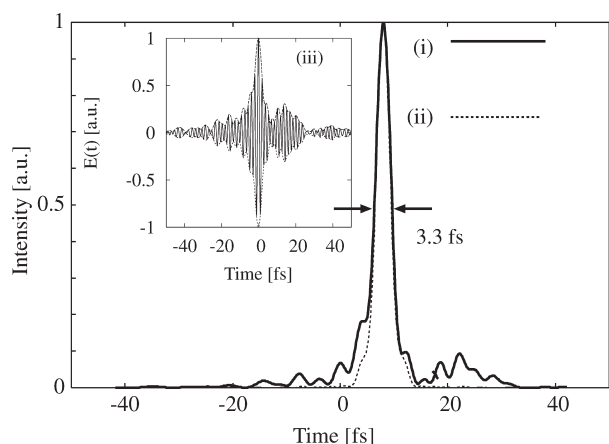


図3 (i) 発生された極短光パルスの強度時間波形および (ii) そのフーリエ変換限界パルス, (iii) CEP $\varphi=0$ rad を仮定した場合の電場波形 $E(t)$.

このように1オクターブを超える帯域を有する CEP 安定化パルスに対し、スペクトル位相計測装置である高感度変形 SPIDER 装置および液晶空間位相変調器を用いた 4-f 位相変調器⁷⁾を組み合わせたフィードバック位相補償装置によって極短光パルス発生を行った。その結果を図3に示す。解析の結果、パルス幅 3.3 fs, 1.7 サイクルの $\sim 0.5 \mu\text{J}/\text{pulse}$ の光パルスが発生されたことがわかった。フーリエ限界パルス幅が 3.0 fs であることから、ほぼ完全に位相補償されていることがわかる。筆者らの知りうる限り、今回得た光パルスは可視から近赤外の領域で CEP を安定化された最短の光パルスである。

2. ま と め

以上、CEP 安定化モノサイクル域光パルスの現状について報告した。現時点では CEP (すなわち電場そのもの) を決定することはできていないが、安定化自体は達成されている。本研究で用いた 4-f 位相補償器を用いれば CEP を制御することは可能であり、CEP 依存の現象解明に使用可能な光源といえよう。現在、増幅器出力の CEP をさらに安定化させるための装置を構築中であり、極限的な短時間現象への応用を進めていく予定である。

CEP 安定化において、京都大学工学研究科の北野正雄博士、杉山和彦博士、産業技術総合研究所の稲場肇博士に

貴重なご助言をいただいたことをここに深く感謝いたします。

文 献

- 1) K. Yamane, T. Kito, R. Morita and M. Yamashita: "2.8-fs transform-limited optical-pulse generation in the mono-cycle-region," *Postdeadline Papers Book of CLEO 2004* (Optical Society of America, Washington DC, 2004) CPDC2.
- 2) M. Yamashita, K. Yamane and R. Morita: "Quasi-automatic phase-control technique for chirp compensation of pulses with over-one-octave bandwidth—Generation of few- to mono-cycle optical pulses," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **12** (2006) 213-222.
- 3) E. Goulielmakis, M. Uiberacker, R. Kienberger, A. Baltuska, V. Yakovlev, A. Scrinzi, T. Westerwalbesloh, U. Kleineberg, U. Heinzmann, M. Drescher and F. Krausz: "Direct measurement of light waves," *Science*, **305** (2004) 1267-1269.
- 4) A. Apolonski, P. Dombi, G. G. Paulus, M. Kakehata, R. Holzwarth, T. Udem, C. Lemell, K. Torizuka, J. Burgdörfer, T. W. Hänsch and F. Krausz: "Observation of light-phase-sensitive photoemission from a metal," *Phys. Rev. Lett.*, **92** (2004) 073902.
- 5) A. Baltuska, T. Udem, M. Uiberacker, M. Hentschel, E. Goulielmakis, C. Gohle, R. Holzwarth, V. S. Yakovlev, A. Scrinzi, T. W. Hänsch and F. Krausz: "Attosecond control of electric processes by intense light fields," *Nature*, **421** (2003) 611-615.
- 6) M. Hentschel, R. Kienberger, C. Spielmann, G. A. Reider, N. Milosevic, T. Brebec, P. Corkum, U. Heinzmann, M. Drescher and F. Frausz: "Attosecond metrology," *Nature*, **414** (2001) 509-513.
- 7) M. Nisoli, S. De Silvestri and O. Svelto: "Generation of high energy 10 fs pulses by a new pulse compression technique," *Appl. Phys. Lett.*, **68** (1996) 2793-2795.
- 8) K. Yamane, Z. Zhang, K. Oka, R. Morita, M. Yamashita and A. Suguro: "Optical pulse compression to 3.4 fs in the monocycle region by feedback phase compensation," *Opt. Lett.*, **28** (2003) 2258-2260.
- 9) M. Yamashita, H. Shigekawa and R. Morita: *Monocycle Photonics and Optical Scanning Tunneling Microscopy* (Springer-Verlag, Berlin, 2005).
- 10) S. T. Cundiff: "Phase stabilization of ultrashort optical pulses," *J. Phys. D*, **35** (2002) R43-R59.
- 11) M. Kakehata, H. Takada, Y. Kobayashi, K. Torizuka, Y. Fujihira, T. Homma and H. Takahashi: "Single-shot measurement of carrier-envelope phase changes by spectral interferometry," *Opt. Lett.*, **26** (2001) 1436-1438.

(2006年9月25日受理)