極短光パルスのキャリアエンベロープ位相制御

キャリアエンベロープ位相(CEP)の精密制御は,光電界波形を直接制御し,数百THzに及ぶ広帯域電磁波を自在に扱える,新たな光波処理技術の キーテクノロジの1つと考えられます.本稿では,極短光パルスのCEP揺ら ぎを低減する方法や光電界位相に直接アクセスする方法を紹介します.

NL なかの ひでとし 石澤 淳 / 中野 秀俊 NTT物性科学基礎研究所

高調波

CEP の精密制御の重要性

従来の光波処理技術では,光パル ス波形とは包絡線の形状を意味しまし た.本研究が成功すれば,光パルスの 包絡線内で高速に振動する光電界 (図1)に直接アクセスし,操作する ことが可能になります.このため,こ れまでの枠組みを超えた,光電界波形 を直接制御するという,新たな視点で 光波処理技術を展開するうえでの今 後のキーテクノロジの1つになると考 えられます. 近年の可視・近赤外波長領域の極 短パルスレーザ技術によって,パルス の半値全幅(パルス幅)が光の振動時 間に極めて近い極短光パルスが容易に 発生できるようになりました⁽¹⁾.この 極短光パルス中で電界振動の位相は, キャリアエンベロープ位相(CEP: Carrier Envelope Phase)と呼ば れています(図1).包絡線内に2, 3周期の光電界しか含まないパルスで は,CEPの値によって瞬時強度が大 きく変化するため,スイッチング,波 長変換等で利用される光非線形性の



発現に大きく影響します.そのため, 極短光パルスを光非線形現象へ適用す るときには, CEPの制御が重要です. 一方,周波数軸上では,CEPを制御 することは,モード同期レーザから発 **生する数百**THz (T:10¹²)の電磁波 を制御することを意味します、モード 同期レーザによるパルス列は正確に、 繰返し周波数間隔で並んだ多数の光で 構成されており、「光周波数コム (Comb: 櫛)」と呼ばれています (図 2(a)). この技術により,光周波数を マイクロ波領域まで直接分周し,光の 周波数を高精度に計測することが可能 になりました.最近,米国国立標準技 術研究所 (NIST: National Institute of Standards and Technology)や独マックス・プランク量子光学 研究所 (MPQ: Max-Planck-Institute of Quantum Optics)は光周波 数の精密測定にCEP制御を使用しま した^{(2),(3)}.ホール氏(NIST)とヘン シュ氏(MPQ)は「光周波数コムな どのレーザを用いた精密分光法の開発 への貢献」により,昨年ノーベル物理 学賞を受賞しました.またこの技術は 高精度な周波数標準および関連する基 礎物理だけでなく,通信,精密計測, 量子情報通信などの分野へ応用されて



いくと考えられます.

CEO**の制御方法**

モード同期レーザは,一定の時間間 隔で光パルスを発生する装置です.そ の隣接するパルス間での光電界振動の 変化 は,共振器内で屈折率変化 により不規則にずれます(図2(b)). 隣接するパルス間における光電界振動 位相のずれる量 はキャリアエンベ ロープ位相オフセット(CEO:Carrier Envelope Offset) と呼ばれてい ます.近年, このCEOを一定にする手 法が実現されました(2),(3).モード同期 レーザ光をフォトニック結晶ファイバ へ集光し,自己位相変調効果を利用 して帯域1オクターブ以上の白色光を 発生させます (図3). マッハツェン ダー型の非線形干渉計によって, CEO 干渉信号を検出します(図4).まず, ダイクロイックミラーで白色光の長波 長成分(1 040 nm)の光を透過さ せ, BBO (Beta Barium Borate) 結晶を使って第二高調波(520 nm) を発生させます.その白色光の長波長 成分の第二高調波(520 nm)と白色 光の短波長成分(520 nm)とを干渉 させ,フォトダイオード等で信号を検 出します.その干渉信号に光周波数オ フセットの情報が含まれています.そ こで,その出力信号の光周波数オフ セット成分だけを抽出し,参照信号 (例えば発振器の繰返し周波数)と比 較します.その周波数成分のずれを電 子回路で安定化します. 例えば,音響 **変調素子(**AOM: Acousto-Optic Modulator)を用いて発振器励起光 源の強度変調を行い、発振器内の屈

折率を制御することにより、CEOを一定にできます.NTT物性科学基礎研究所では、CEOが / 2 ずつずれるように安定化しました.これは、4回に1回の割合で同一なCEPの光パルスが発生していることを意味します.

極短光パルス発生

極短光パルスでは、CEPがコヒーレ ント相互作用や高次非線形現象に影響を及ぼします.また光電界強度が高いほど、大きい非線形効果が期待され、CEPに依存した現象が観測しやすくなります⁽⁴⁾.NTT物性科学基礎研究所ではマルチパスチタンサファイアレーザ増幅器を使用して、前述のCEO安定化モード同期レーザからの極短光パルスの高出力化に取り組みました.そして、発振器の光パルスのうち、同一のCEPの光パルスを抽出して光増幅しました.増幅の結果、パルス幅 25 fs, エネルギー1mJの光パルスが 得られました.パルス幅を狭くするに は,広いスペクトル幅の光パルスが必 要になります.そこで,増幅光をNe (ネオン)ガスが充填された中空光導 波路を通過させて,自己位相変調効



図4 マッハツェンダー型の非線形干渉計





果によりスペクトル幅を広げました(図 5(a)).その後,ミラーの反射特性を 利用して群速度分散の補正を行い,パ ルス幅を狭さく化し,パルス幅5.8fs, エネルギー0.3 mJの光パルスを得るこ とができました(図5(b)).この光パ ルスは中心波長が716 nmであり,光 パルス内に光電場が2サイクル程度し か存在しません.

<mark>極短光パルスの</mark>CEP**揺らぎの** 安定化

NTT物性科学基礎研究所では,パ ルス圧縮用の中空光導波路内のガス圧 力増加に伴い,CEP揺らぎが増加す ることを確認し,そのCEP揺らぎが最 小となるガス圧力の条件を見いだし ました.増幅光のスペクトルは1オク ターブ以上の帯域にわたっています. その白色光の短波長成分と長波長成 分の第二高調波の位相差は光パルスの CEPに関する情報を持つために、CEPの相対的な時間変化を観測できます⁽³⁾.見いだした最適条件の下で、パルス幅5.8 fsの増幅光パルスのCEP 揺らぎを約20秒の範囲内で、± / 8 rad以下に低減することに成功しました⁽⁴⁾(図6).

極短光パルスのCEP 直接測定

最近,超短パルスレーザ発振器の 光を使用した半導体との非線形相互作 用にCEP依存性が観測されていま す^{(5),(6)}.例えば,超短パルスレーザ 発振器の光と低温成長GaAs(ガリウ ム砒素)との相互作用による遷移過程 でヤングの2重スリット*と同じような 干渉が起き,CEP依存性を示す光電 流が観測されています⁽⁵⁾.このような, 安定性の良いレーザ発振器の光を使っ た,CEP依存性を示す非線形現象の 観測は光スイッチ等の応用に期待され ています.

NTT物性科学基礎研究所では,第 二高調波と第三高調波間の干渉を利 用したCEP直接計測方法を提案しま した.この方法は,これまでの増幅光 パルスを使用したCEP直接計測法と比 べ,2桁程度低いレーザエネルギーで, 簡便にCEPを直接測定できる利点が あります.レーザパルスを斜入射で固 体ターゲットへ集光すると,偶数次と 奇数次の高調波が発生します⁽⁷⁾.この とき,極短光パルスのスペクトル幅が 広いため,第二高調波と第三高調波 のスペクトルの一部で重畳します.重 畳した領域のスペクトルを観測すると, CEPに依存した干渉信号が現れます.

NTT物性科学基礎研究所では,こ の方法を使って異なるCEPの干渉信号 を計測しました (図7). CEPを可変 とする目的で一組のガラスウェッジプ レートを光路に設置しました.ガラス ウェッジプレートの挿入量により,分 散値を変化させてCEPの値を変えるこ とができます.その結果,干渉強度が CEP依存性を示していることが検証さ れました.本実験では,1 µ Jのレー ザエネルギーをガラス表面に斜入射で 集光して第二高調波と第三高調波を 発生させました.しかし,通常のチタ ンサファイアレーザ発振器(数nJ)を 使用した場合も,高調波発生媒質の **工夫によって**⁽⁷⁾, CEPを直接計測する ことが可能であると見積られます.今 後,超短パルスレーザ発振器の光を使 用した固体の非線形相互作用において CEP依存性を示すさまざまな現象が観

* ヤングの2重スリットの干渉実験:光が波であ ることを証明した.



測されると考えられます.そのとき,こ のCEP直接測定法がCEP依存性を利 用した応用研究に役立つことを期待し ています.

今後の展望

極短光パルスのCEPを精密に制御 することは、非線形現象の観測におい て重要なパラメータの1つになってき ました.NTT物性科学基礎研究所で は、極短光パルスを使用して光波内の 光電界振動へ直接アクセスし、制御す ることを探求しています.本研究が成 功すれば、光電界の振る舞いならびに 物質との相互作用を自在に制御するこ とが可能となり、光波の光搬送波レベ ルでの完全制御による超高速光信号処 理技術を創出できると考えられます.

参考文献

 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. , $V\,\text{ol.}$ 28, No. 22, pp. 2258-2260, 2004.

- (2) D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka, A. Stentz, R. S. Windeler, J. L. Hall, and S. T. Cundiff: "Carrier-Envelope Phase Control of Femtosecond Mode-Locked Lasers and Direct Optical Frequency Synthesis, "Science, Vol. 288, pp. 635-639, 2000.
- (3) S. A. Diddams, D. J. Jones, J. Ye, S. T. Cundiff, J. L. Hall, J. K. Ranka, R. S. Windeler, R. Holzwarth, T. Udem, and T. W. Hänsch : "Direct Link between Microwave and Optical Frequencies with a 300 THz Femtosecond Laser Comb," Phys. Rev. Lett., Vol. 84, No. 22, pp. 5102-5105, 2000.
- (4) A. Baltuška, Th. Udem, M. Uiberacker, M. Hentschel, E. Goulielmakis, Ch. Gohle, R. Holzwarth, V. S.Yakovlev, A. Scrinzi, T. W. Hänsch, and F. Krausz: "Attosecond control of electronic processes by intense light fields, " Nature, Vol. 421, pp. 611-615, 2003.
- (5) M. Kakehata, Y. Fujihira, H. Takada, Y. Kobayashi, K. Torizuka, T. Homma, and H. Takahashi: "Measurements of carrierenvelope phase changes of 100-Hz amplified laser pulses," Appl. Phys. B, Vol. 74, pp. S43-S50, 2002.
- (6) A. Ishizawa and H. Nakano: "Fluctuation of the Carrier-Envelope Phase of a Few-Cycle Laser Pulse from a Chirped-Pulse Amplification System with the Gas Pressure in a Hollow Fiber, "Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 44, No. 8, pp. 6039-6041, 2005.
- (7) P. A. Roos, Q. Quraishi, S. T. Cundiff, R. D. R. Bhat, and J. E. Sipe "Characterization of

quantum interference control of injected currents in LT-GaAs for carrier-envelope phase measurements, " Optics Express, Vol. 11, No. 17, pp. 2081-2090, 2003.

- (8) O. D. Mücke, T. Tritshcler, M. Wegener, U. Morgner, and F. X. Kärtner: "Signatures of Carrier-Wave Rabi Flopping in GaAs," Phy. Rev. Lett., Vol. 87, No. 5, pp. 0574011-0574014, 2001.
- (9) Gy. Farkas and Cs. Tóth: "Observation of multiple-harmonic radiation induced from a gold surface by picosecond neodymium-doped yttrium aluminum garnet laser pulses," Phys. Rev. A, Vol. 46, No. 7, pp. R3605-R3608, 1992.
- (10) A.Ishizawa,H.Nakano: "Controlling the Carrier-envelope phase of a Few-cycle Optical Pulse", NTT Technical Review, Vol.3, No.12, Dec. pp.45-51, 2005.



(左から)石澤 淳/中野 秀俊

光パルスの包絡線内で高速に振動する光 電界に直接アクセスし,操作可能とする技 術を確立することにより,サプフェムト秒 領域の時間制御への道を開拓したいと考え ています.

問い合わせ先 NTT物性科学基礎研究所 量子光物性研究部 量子光デバイス研究グループ TEL 046-240-3444 FAX 046-270-2361 E-mail ishizawa@will.brl.ntt.co.jp