

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 高強度光電界による電子操作技術の開拓

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点):

研究代表者

渡部 俊太郎 (東京理科大学総合研究機構 教授)

主たる共同研究者

鳥塚 健二 (産業技術総合研究所光技術研究部門 副部門長、グループリーダー)

(平成 18 年 10 月～平成 24 年 3 月)

3. 研究実施概要

代表者は 2005 年第 5 回超高速光学/第 11 回高強度短波長光源の応用合同国際会議 (UFO/HFSW2005) を奈良で開催した。この分野の著名な研究者が参加したが、その中心テーマは(1) 高調波によるアト秒パルスの発生、(2)絶対位相(キャリアーエンベロップ位相(CEP))の制御、(3)光パラメトリックチャープパルス増幅(OPCPA)であった。

このプロジェクトはいわば、この 3 大テーマを結合した大胆なものである。このようなプロジェクトを単独でこなせるグループはなく、必然的に連合チームを組まざるを得ない。東大物性研究所渡部研と産総研鳥塚グループの連携はこの会議が出发点であった。

当初物性研はチタンサファイアレーザーの 2 倍波パルス(サブ 10fs)を用い、860 アト秒パルスを発生し、自己相関法による測定に初めて成功した。産総研では CEP を制御したモード周期チタンサファイア(3w)とパラメトリック発振器(OPO 出力) ω 、 2ω およびこれらの倍波(4ω 、 5ω 、 6ω)からなるサブハーモニックの光電場合成を行っていた。

これを受けてこのプロジェクトのテーマは(1)CEP 制御した TW 級 OPCPA の開発、(2)これを用いた 10nm-水の窓領域でのサブ 100 アト秒発生、(3)高出力ファイバーレーザーの開発と多波長光源の OPCPA による μJ 級任意電場波形の生成、(4) (2)と(3)によるアト秒オシロスコープと電子操作であった。

(1)では産総研が CEP 制御を担当し、OPCPA を物性研が開発した。両グループの共同研究が機能し、OPCPA では最短パルス(5fs)と最高平均出力(2.7W)を達成し、パルスガスジェット中の自己位相変調を用いて 3.8fsを得た。(2)では水の窓領域の高調波の発生に成功し、また世界で初めて 10nm 以下で高調波の CEP 効果を観測した。(3)ではモード同期ファイバーレーザー発振器から最短パルス(28fs)の発生に成功した。またファイバーレーザーCPAにより 25W まで増幅し、2 倍波を OPCPA の励起光源として使用した。OPCPA の出力は3波長(2ω 、 3ω 、 4ω)でサブ μJ が得られた。

(4)に関しては機能を分けて分担することを中間評価の段階で行った。(4)ではアト秒オシロスコープ(アト秒電子操作)と任意電場波形の測定の機能がある。前者の任意波形電場のかわりに赤外のサイン波を使うことにした。赤外光だと、周期が大きいため掃引時間が長く取れる上に、電子をドライブする力が波長の2乗に比例して大きくなる。ただしCEPの制御は必要である。この方針に沿ってスーパーコンティニュームの差周波の OPCPA により CEP 制御された赤外光の発生に成功した。また 8.2 fs へのパルス圧縮を行い高調波発生を行って、カットオフ領域のコンティニュームを観測した。これにより、ストリーク法によりアト秒パルスが観測でき、アト秒オシロスコープが可能となる。また任意電場波形の測定はまず 2ω 、 3ω 、 4ω を選び($2\omega+4\omega$)と($2\times 3\omega$)、($2\times 2\omega$)と 4ω の干渉から光源の合成波形を再構築することに成功した。またより一般的には多光子イオン化領域の量子干渉効果を利用した測定を試みている。

以上まとめると、本研究のテーマは時宜を得たものと考えられる。また物性研と産総研グループの連合チームは相補的で自然なものであった。一部数値目標が未達成のものもあるが、計画の大胆さからすれば、満足すべき成果が上がったと考える。

4. 事後評価結果

4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

世界最高のパルス幅、平均パワーの CEP 制御 OPCPA システムの開発に成功し、超高強度電界によるトンネリング電子発生で、コヒーレント電子の発生、再結合プロセスで高次高調波の発生に成功している。従来から高調波発生で実績を積み重ねているので、予定通り、世界最短波長での CEP 制御、30as という超短パルス発生は実現できると予想するが、評価会現在(2012 年 12 月)においてフルセットによる実験が行われておらず、目標は未達成となった。中間目標として、Krausz らの達成した 80as をより明確に発生することができたはずだが、30as という目標にこだわったため未達成となった。確かに理論上は達成可能なはずなので、研究終了時までには達成することを期待する。

また、CEP 制御された多色パラメトリック増幅の任意電界波形の合成によりアト秒ストリークやオシロスコープを実現する目標は、3色電界合成を原理実証することに成功した。しかし、アト秒オシロスコープを実現するための掃引電界実現には相当の差があり、オシロスコープ実現とはいえない。

総じて、OPCPA システムの開発、超短パルスファイバーレーザーの開発、多色パラメトリック増幅器の開発など、レーザー技術については優れた技術を発揮して世界最高レベルの装置開発に成功している。一方、その応用については、若干キャッチフーズが大きすぎることもあり、原理実証にとどまったきらいがある。しかし、実際、この研究の先に、それらが可能になることは確実なので、今後の発展に期待したい。論文発表、国際会議の発表については、十分な量と質であるが、特許申請件数0であるのは残念である。

4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

世界最高性能を実現しているように、レーザー技術の開発では世界レベルを到達している。同時に高調波発生の短波長化、X 線領域における世界最短パルスを達成することにこだわったため、そのための装置開発に終始したような印象を与えてしまった。科学研究の分野としては、最高水準の装置開発とそれが生み出す最先端科学の例示を並行して行う必要がある。そのためには、実験装置開発だけではなく、将来を見せる技術、そして、それを支える理論的展開が必要とされるが、世界の中枢研究所に比べて、この点が弱い。これはこの研究グループ単独の問題ではなく、我が国の研究組織が共通して抱える問題でもある。競争相手である MPQ の Krausz グループは今や巨大な陣容でアト秒科学を推進している。装置開発能力では MPQ に比べても決して引けを取っていない。

世界最短波長での CEP 制御、多色パラメトリック増幅による同期された超短パルス発生などの技術は、戦略目標に向かうための基盤的技術であり、これなくしては将来の発展は期待できない。ただし、本当の目的を達するには、より高精度の位相同期が必要になると考えられ、現時点で技術的に完成したとはいえない。これらの技術をより確実にして、誰もが使える時代を作ることこそ、この研究の成果となるべきである。それらが実現されると、本当にレーザー光の電界を利用した科学が生み出されるので、大きな社会的インパクトを与えることができる。

4-3. 総合的評価

本 CREST は、軟 X 線における世界初の高強度サブ 100 アト秒パルス発生とアト秒オシロスコープによる電子操作を目的とした極めて挑戦的な研究課題である。少人数の研究チームで、限られた予算の中で、この研究課題を達成するのは至難の業であると思う。東大グループと産総研グループの共同研究がうまく機能して、世界最先端の OPCPA 装置の開発や高強度アト秒パルス発生のための CEP 制御の実現など、軟 X 線で 60 アト秒の高強度パルス発生まで、あと一歩まで迫った点は大いに評価できる。

一定の成果が得られているが、当初目標と比べると十分とはいえない。チームが一丸となり、年度末までに所期の成果を挙げることを期待したい。