文部科学大臣表彰（研究支援賞）を受賞して

極限コヒーレント光科学研究センター　技術専門員　金井 輝人

受賞理由となった技術的貢献・支援の内容

1990 年代以降、高出力超短パルスレーザー技術は飛躍的に発展し、大学の実験室規模で多様な光を提供できるようになった。特に 2000 年代以降、超短パルスレーザーを増幅して非常に高い強度とすることで、レーザーでは発生が困難だった軟X線領域の超短パルスや、アト秒という極限的に短い時間スケールの超短パルスの発生が可能となった。

東大物性研では 1980 年代より、高出力超短パルスレーザーによる短波長光発生を目標として、「極限レーザープロジェクト」が実施され、世界有数の超短パルスレーザー開発拠点となっている。最先端のレーザー光源を開発し、いち早く新分野の開拓や、物性研究への応用を展開することが可能となる。また、最先端の光源を物性科学ユーザーに提供することは全国共同利用研の責務であり、開発した光源の維持・運用および高度化のための開発を継続することは、きわめて重要である。

今回受賞理由になったこれらの最先端レーザーの開発における支援研究 2 つを紹介する。

(1) 広帯域波長変換技術による可視域での超短パルス光の発生に対する技術的貢献

超短パルス光を発生させるためには、光の特性として広帯域なスペクトルが必要である。理想的な非線形波長変換によって周波数を 2 倍(波長を 1/2 倍)にすれば、スペクトル幅は√2倍になるので、パルス幅を短縮させる事が可能になるはずである(図 1(a))。しかし、フェムト秒領域の超短パルスの場合には、単純に波長変換しただけでは波長変換を満たす条件が特定の波長のみとなるため(位相整合角が全帯域では合致しないため)、狭帯域化してしまう(図 1(c))。図 1(a)が理想的に波長変換されたときのスペクトル(計算値)であるが、単純に波長変換した場合が図 1(c)であり、せっかく周波数が 2 倍になってもスペクトル幅は約 1/2 になってしまいパルス幅は長くなってしまう。

そこで筆者が実証したのが「広帯域波長変換技術」である。全波長域で位相整合条件を満たすような光学系を考案し、全帯域に渡って波長変換がなされることにより、図 1(b)のようなスペクトルを得た。この条件を満たすためには光学系の設計のみならず、周波数に対して位相整合角が線形な(周波数に比例する)特性を持つ非線形結晶を選択しなければならない。それら最適な光学系の作成と非線形結晶の選択を実験で試行錯誤し、広帯域波長変換を実現させた(1)。この波長変換技術を用いて、基本波(波長 800 nm)25 フェムト秒から二倍波(波長 400 nm)12 フェムト秒の高出力超短パルス発生に成功した(2)。本光源により、世界初の真空紫外域でのアト秒パルス発生と波形測定は成功に導かれた。

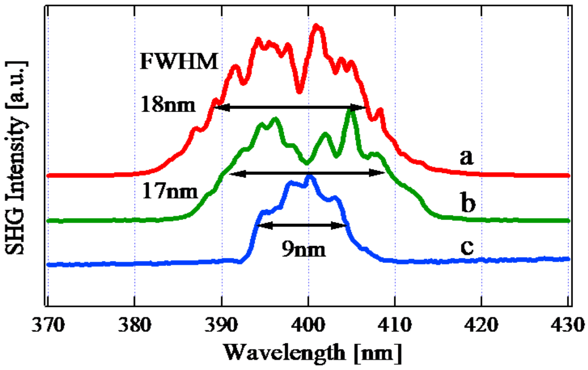

図 1：筆者が開発した可視域での広帯域波長変換の結果。(a)レーザー 基本波(波長 800 nm)がそのまま波長変換された場合のスペクトル(計算値)、(b) 広帯域波長変換技術によって得られたスペクトル、(c) 広帯域波長変換技術なしに単純波長変換されたスペクトル。

(1). T. Kanai, Z. Zhou, T. Sekikawa, S. Watanabe, and T. Togashi, “Generation of sub-TW, sub-10 fs blue pulses at 1-5 kHz by broadband frequency doubling,” Opt. Lett. **28**, 1484-1486 (2003).

(2). T. Kanai, Z. Xu, T. Liu, A. Kosuge, T. Sekikawa, and S. Watanabe, “Generation of terawatt 10-fs blue pulses by compensation for pulse-front distortion in broadband frequency doubling,” Opt. Lett. **29**, 2929-2931 (2004).

（2）KBBF 結晶による波長変換技術を用いた深紫外光の発生に対する技術的貢献

半導体露光装置用では「ムーアの法則」による半導体の高集積化のために、より短波長の光源が求められる。図 2 に示すように光源の短波長化と高集積化（微細化）は年とともに着実に進んできた。その結果、2000 年代には現存する非線形結晶では発生できない短波長領域のレーザー光源が模索された。

折しも中国科学院の陳博士らが開発した KBBF と称する新しい非線形結晶が真空紫外域（200 nm 以下）の波長変換に適応できるものとして登場した。この結晶を用いて日中共同研究として、次なるトレンドと目されていた F_2 リソグラフィー（波長 157 nm）の発生に筆者は挑戦し、高出力チタンサファイアレーザーの 5 次高調波として発生を成功させた(3)。この光源は非線形結晶による波長変換を 4 回行う複雑な光学系であり、緻密で根気強い実験の成果であった。

一方で、物性科科学における強力な研究手法である光電子分光法の分野でも、より高分解能な測定を目指して、ヘリウムランプに代わる、新たな光源が求められていた。真空紫外域への波長変換が可能な KBBF 結晶を利用すれば光電子分光用光源に適用できると考え、筆者はその光源開発に着手し、波長 200 nm で W（ワット）級の高出力な深紫外光発生に成功した(4)。光電子分光用光源としては出力だけでなく、高分解能化のためにレーザー光の狭帯域化と、光電子分光における空間電荷効果の抑制のための高繰り返し化を図り、光子エネルギー7 eV（波長 177 nm）での真空紫外光の発生を実現し、超高分解能レーザー光電子分光用のための光源利用が開始された。

以上、筆者の学位取得に繋がるとともに、研究の支援に大きく貢献した光源開発について紹介した。

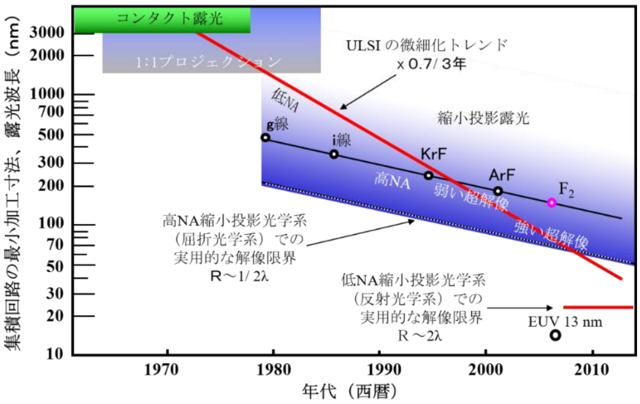

図 2：半導体露光装置（ステッパー）の露光用光源の年代別推移。光源の短波長化により、最小加工寸法の縮小が実現してきた（ナトリウム g 線：589 nm、ナトリウム i 線：365 nm、KrF レーザー：248 nm、ArF レーザー：193 nm、F_2 レーザー：157 nm）。

(3). T. Kanai, T. Kanda, T. Sekikawa, and S. Watanabe "Generation of VUV light below 160nm in KBBF crystal by the 5th harmonic of a single-mode Ti:sapphire laser" J. Opt . Soc. Am. B **21**, 370-375 (2004).

(4). T. Kanai, X. Wang, S. Adachi, S. Watanabe, and C. Chen "Watt-level tunable deep ultraviolet light source by a KBBF prism-coupled device," Opt. Express, **17**, 8696