

# The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR2013) において "Best Paper Award" を受賞して

極限コヒーレント光科学研究センター 小澤 陽、小林 洋平

この度、本年7月に京都で開催されました国際会議 "The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013)" において、"Intracavity High Harmonic Generation At 80 and 10 MHz Repetition Rates" という内容で発表を行い、Best Paper Awardを受賞することができました。CLEO-PRはアジア、環太平洋地域で2年おきに開催され、主に量子エレクトロニクス、レーザー科学を中心として広い分野の研究者が集まる国際会議です。本発表は極限コヒーレント光科学研究センターの小林グループにおける、真空紫外域レーザー装置の開発状況及び応用実験の結果について報告したものです。真空紫外レーザーの開発というテーマは小林グループ発足時から5年以上にわたって計画、準備されてきたものであり、近年ようやく国際会議や論文で発表できるような最先端の成果が得られ始めたところです。装置の一部は複雑かつ大型であり開発に人手を要することもあって、本テーマの遂行には初期の準備段階から今まで多くの学生や研究員の方々の貢献がありました。この受賞研究の遂行にあたりご協力いただきました関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

本研究ではさまざまな物性研究や分光への応用を将来的な目標として真空紫外線領域(波長にして 30~200nm)のレーザーを開発しました。真空紫外線領域のレーザーは高い励起光子エネルギーが必要とされる光電子分光や原子分子の吸収分光への応用が考えられます。また、波長が短いことを生かして超微細加工や半導体露光光源としての応用も期待されています。一方で真空紫外域領域で発振する実用的なレーザーを開発することは容易ではなく、発振可能波長範囲や分光応用のための制御性の点で様々な制約があるものでした。今回の研究では1 $\mu$ mという赤外線域で発振する高強度のパルスレーザーを開発したうえで、高次高調波発生とよばれる非線形過程をもちいて真空紫外域への波長変換を行いました。高次高調波発生は強い光電場を原子や分子ガスに照射した際に生じる非線形過程です。元の光周波数の奇数倍の光周波数をもつ高調波を得られることが知られており、真空紫外域から軟 X 線に至るコヒーレントな光源として研究されてきました。この高次高調波の発生には、原子中の電子が原子核から受ける電場強度に相当する非常に大きい光電場を発生する必要があり、強いパルス強度を持つパルスレーザーが必要となります。従来このような高強度パルスレーザーは技術的な課題により一秒間あたりに発生できるパルス数が10<sup>3</sup>個程度と割合低いものでした。今回の研究では、共振器内高次高調波発生とよばれる手法を用いて、一秒間に約10<sup>8</sup>個という従来の手法とは比べ物にならない高い繰返し周波数で高次高調波発生を行い真空紫外パルス列を発生することに成功しました。一般的に高次高調波発生は赤外光から真空紫外光への変換の効率が10<sup>-6</sup>程度とあまり高くありません。このため一度波長変換に用いた赤外光をリサイクルして何度も高次高調波発生を行うことで波長変換の効率を高めることができます。高精度に制御された共振器を用いてこの手法を実現することにより、高繰返しで高強度な真空紫外パルス列を発生できるようになりました。高繰返しな真空紫外パルス列は光電子分光に応用した場合、パルス一個当たりの光電子数を低く抑えつつ、さらに高いカウントレートを得ることができるため、スペースチャージの効果を抑えた高精度な紫外光電子分光(UPS)用光源として適していると考えられます。

本研究で開発した真空紫外パルスレーザーは空間的、時間的に光位相のノイズがきわめて小さいコヒーレントな光源です。一つのパルスが発生してから次のパルスが発生するまでの時間間隔は約10nsですが、この間レーザーは光位相の情報を保ったまま稼働し続けパルス間の光位相関係を正確に維持したパルス列を生成します。このように時間的コヒーレンスが高いパルスレーザーは、その光スペクトルが細い等間隔のピークを多数集めたような櫛状の構造を持つことが知られています(光周波数コム)。光周波数コムは可視光から赤外線の領域で開発、実用化され、正確な光周波数標準として応用されてきました。今回開発した真空紫外域パルス光源は、高次高調波発生という複雑な過程を用いているにもかかわらず、パルス間のコヒーレンスは十分に高く紫外域の光周波数コムとして応用できることが検証の結果分かりました。実際に

応用実験の一例として、開発した真空紫外コムを用いてキセノン原子の一光子吸収の遷移波長を正確に測定することができました。真空紫外域には従来、原子の精密な分光を行えるような高精度なレーザーがなかったため、今後さまざまな原子種の真空紫外域の遷移がより正確に測定できるようになると期待されます。このような原子の精密分光は、遷移エネルギーを理論的に予測する量子力学の検証実験として基礎物理への貢献が期待されます。また光周波数コムは多数の細いピーク状のスペクトルからなるため、その一本を抜き出すとそれはあたかも(パルスレーザーではなく)真空紫外連続光レーザーとして例えば原子のレーザー冷却や高精度光時計に応用することができると期待されます。

このような応用を考えた場合、真空紫外光の平均出力が数  $\mu\text{W}$  程度と比較的低いことが問題点と考えられました。より高強度な真空紫外光を発生させるため、一秒間あたりのパルス数を 1/10 に減らすかわりに、より高効率に高次高調波発生を行い高強度の紫外光が得られるシステムを開発しました。装置は一边が 15m ある大型なものです。D棟実験室に広いスペースを確保することができ、また振動や室温変化に敏感な実験であるにもかかわらず十分に安定な環境を準備することができました。この改良により sub-mW レベルの真空紫外光を発生し平均出力を 3 桁向上させることに成功しました。波長領域にもよりますが、将来的には軌道放射光設備で行われるような高強度紫外光を必要とする物性測定の一部が、今回開発した真空紫外レーザーでできるようになる可能性もあると考えております。

真空紫外レーザーの開発は私が物性研に着任した当初から一貫して進めてきたテーマであり、さらにその中でも真空紫外域のコム分光測定は博士の学生の時から実に 7 年近くにわたって夢見てきた実験でした。このような長期間にわたって目標に向かって進められる環境を得られたことを幸運に思うとともに、協力していただいた方々に改めて感謝いたします。また、長年続けてきた研究がこのような形で賞を頂けたことを非常にうれしく思います。今回の研究は装置の開発という技術的側面が強いものですが、開発した技術、装置が今後より幅広い分野に浸透して、そこから従来のレーザーでは不可能であった、新しい知見が得られるような応用実験につながっていくことを期待しております。

