

オートコリレーションによるピコ秒光陰極励起用 UV レーザのパルス長測定 PULSE DURATION MEASUREMENT OF PICO-SECOND UV PHOTOCATHODE DRIVING LASER BY AUTOCORRELATION TECHNIQUE

全 炳俊#, 中嶋 隆, 紀井 俊輝, 増田 開, 大垣 英明

Heishun Zen, Takashi Nakajima, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Hideaki Ohgaki

Institute of Advanced Energy, Kyoto University

Abstract

Photocathode RF guns have been used as high brightness electron sources. Measurement of the pulse duration of photocathode drive laser in deep UV wavelength is quite important to estimate the electron beam properties generated from the RF gun. The pulse duration measurement has been performed by using streak cameras, which is quite expensive and difficult to use. The autocorrelation technique has been commonly used for pulse duration measurement of laser pulses. Two-photon absorption has been utilized as the nonlinear process in the autocorrelation measurement of short pulse laser beams in deep UV wavelength region. In this study, deep-UV autocorrelator utilizing the two-photon absorption in a sapphire plate as the nonlinear process was developed. The developed autocorrelator was used for measuring the pulse duration of ps-deep-UV laser pulses which has been used for driving photocathode RF guns in the free electron laser facility at Institute of Advanced Energy, Kyoto University. As the result, the pulse duration of deep-UV laser pulse was measured as 5.8 ± 0.2 ps-FWHM. The influence of laser intensity on the measurement results is also reported in this paper.

1. はじめに

近年、光陰極高周波電子銃は高輝度電子ビーム発生に広く用いられるようになってきており、京都大学エネルギー理工学研究所でも既存 4.5 空胴高周波電子銃中の LaB₆ 陰極に UV レーザ(波長 266 nm)を照射し、光電子放出により電子を供給する事で、中赤外自由電子レーザーの高性能化を達成している[1]。また、1.6 空胴高周波電子銃中の銅陰極に UV レーザを照射し、発生させた電子ビームを用いて、小型 THz 光源の開発を進めている[2]。光陰極励起に使用される UV レーザのパルス長は発生した電子ビームの特性を大きく左右する重要なパラメータである。従来、ストリークカメラがその測定に用いられてきたが、非常に高価であり、扱いも容易でない事から、今回、サファイア基板中での非線形吸収を用いたオートコリレータを構築し、パルス長の測定を行った。測定原理、測定装置、および測定結果をここに報告する。

2. 測定原理

レーザーパルス長の測定には強度オートコリレーション法が一般に用いられている。強度オートコリレーション法の概念図を Figure 1 に示す。測定対象であるレーザー光はビームスプリッタにより 2 つに分けられ、片方は光学距離の調整が可能な遅延ステージを通して、もう片方は直接、非線形媒質に入射される。非線形媒質としては 2 次の非線形光学結晶がよく利用されており、この場合、出てきた 2 次高調波光の強度が光測定器で測定される。2 次高調波光の強さは入射される 2 つの光パルスの強さの積に依存する為、2 つの光パルスの時間差を変化させると 2 次高調波光強度が変化する。非線形光学結晶上での 2 つの光パルスの時間的な重畳条件を変えていき、時間差と 2 次高調波光の強さの関係を測定した結果からパルス長を評価する事ができる。

我々のグループで光陰極の励起に用いているレーザーの波長は 266 nm(Nd:YAG レーザの 4 倍波)であり、その更に 2 倍波は 133 nm となる。この波長域の光は真空紫外線と呼ばれ、大気吸収が大きく取り扱いが困難である。その為、波長 266 nm のレーザーパルスの長さ測定に 2 次高調波発生結晶を用いるのは得策とは言えない。そこで、これまで波長 266 nm のレーザーパルス長測定には物質中での 2 光子吸収が利用されてきた[3, 4]。この手法では測定対象となるレーザー光を強度の強いポンプ光と強度の弱いプローブ光に分割し、プローブ光透過率の遅延時間依存性を測定する事でオートコリレーション測定を行う。2 次高調波結晶において必要となる位相整合条件の調整が不要であり、2 つのレーザー光を 2 光子吸収が生じる非線形吸収媒質上で空間的にオーバーラップさせるだけで良い。先行研究[4]において様々な材料における 2 光子吸収の強度や測定可能最小パルス長の理論予測結果が報告されており、これを参考に、本研究では

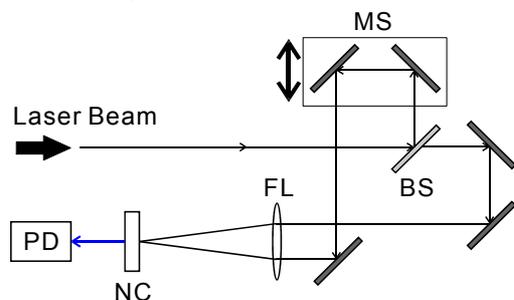


Figure 1: Basic setup of intensity autocorrelator used for laser pulse duration measurement. MS: Movable Stage, BS: Beam Splitter, FL: Focusing Lens, NC: Nonlinear Crystal, PD: Photodiode.

zen@iae.kyoto-u.ac.jp

入手が容易で波長 250 nm 近辺において 2 光子吸収強度が大きいサファイアを 2 光子吸収媒質として用いる事とした。

3. 測定装置

UV レーザパルス長測定のために構築した非線形吸収を利用したオートコリレーション測定装置の概略図を Figure 2 に、写真を Figure 3 に示す。本装置に入射された UV レーザ光はビームサンプラー(BS)により一部を切出され、リファレンス検出器(Ref. PD)に入射される。ビームサンプラー(BS)を通過した UV レーザ光はもう一枚のビームサンプラー(BS)により更に一部を切出される。ビームサンプラーの透過光は強度が強くなり、ポンプ光として用いられ、2 枚のミラーで反射された後、レンズ(FL)を通してサファイア基板に照射される。また、ビームサンプラーの反射光は強度が弱く、プローブ光として用いられ、光学時間遅延路(MS)を通った後にレンズを通してサファイア基板に照射される。プローブ光はサファイア基板(SP)透過後にシグナル検出器(Sig. PD)に入射される。リファレンス検出器(Ref. PD)とシグナル検出器(Sig. PD)の前

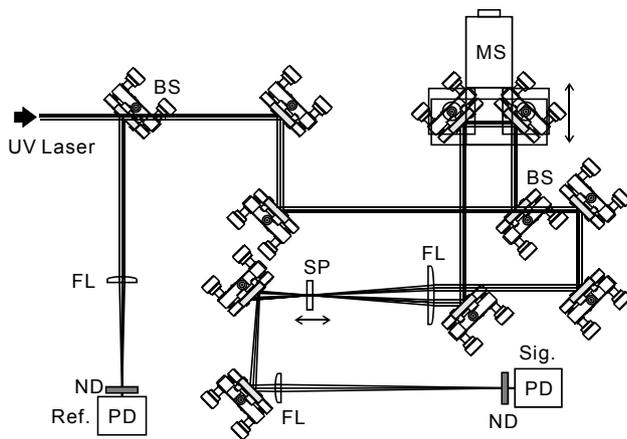


Figure 2: Schematic diagram of UV autocorrelator utilizing the two photon absorption in a sapphire plate as the nonlinear process. BS: Beam Sampler, MS: Movable Stage, FL: Focusing Lens, SP: Sapphire Plate, ND: Neutral Density Filter, PD: Photodiode.

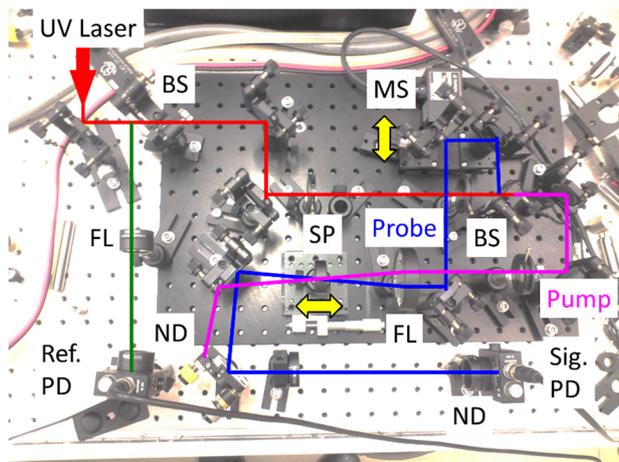


Figure 3: Photograph of UV autocorrelator.

にはそれぞれ集光レンズ(FL)を設置し、集光する事でレーザ光位置変動の影響の低減を図っている。また、二つの検出器で得られた信号強度の比をとる事により、レーザ光の強度変動の影響を低減する様にした。サファイア基板(SP)は 1 軸ステージ上に設置され、このステージを移動させる事で、UV レーザ光の焦点からの位置を変化させられる様にしてある。これにより、UVレーザ光のビームサイズを変化させ、サンプル上での集光強度が変えられるようになっている。オートコリレーション測定に先立ち、ポンプ光強度のサファイア基板位置依存性を測定し、サンプル位置の調整を行い、10%程度 of 非線形吸収が生じる条件に合わせている。これはポンプ光の非線形吸収が小さすぎるとプローブ光とオーバーラップしてもプローブ光の非線形吸収が小さく、S/N 比が悪くなり、逆にポンプ光の非線形吸収が大きすぎると、非線形吸収以外の非線形効果も顕在化し、測定結果に悪影響を及ぼす為である。非線形吸収が大きすぎる場合に見られる悪影響については 4.2 節にて述べる。

4. 測定結果

4.1 UV レーザパルス長測定結果

これまでに京都大学エネルギー理工学研究所にて開発してきた深紫外ピコ秒パルスレーザ[5]を測定対象とした。このレーザはマルチパルス発生用に開発されたものであるが、本測定では独立パルスのパルス長を測定する為、シングルパルスを発生させ、そのパルス長を測定した。Figure 4 にサファイア基板(厚さ 2 mm)の位置を変化させた際のポンプ光透過率変化を示す。集光点に近ければ近いほど、また、ポンプ光のパルスエネルギーが高いほど透過率が下がり、2 光子吸収が生じていることが分る。パルスエネルギーが 2.5 μJ の際の最大透過率変化は集光位置において 32%であり、パルスエネルギーが 18 μJ の際はサファイア基板を集光位置に調整すると、サファイア基板がアブレーションされた。以降の実験では、空間オーバーラップの調整しやすさを考え、集光スポットが小さすぎないサファイア基板位置 12 mm、レーザのマクロパルスエネルギー18 μJ の条件にて実験を行った。この条件下ではポンプ光の非線形吸収量は 5~10%程度である。

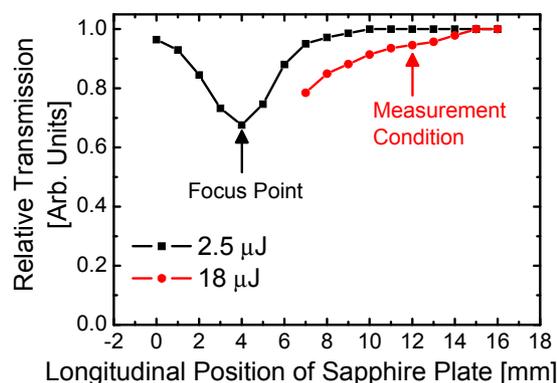


Figure 4: Variation of pump laser transmission as the function of the longitudinal position of a sapphire plate (2 mm thick) and pulse energy of the pump laser.

次に、パルス長測定結果に移る。Figure 5 に典型的な測定結果を示す。この測定に使用したサファイア基板の厚みは 2 mm である。(a)には 1 測定中のリファレンス検出器出力とシグナル検出器出力のプロープ光遅延量依存性を示した。UV レーザ自身が変動している事がリファレンス検出器出力変化から見て取れる。(b)にはシグナル検出器出力をリファレンス検出器出力で割った結果を示した。リファレンス検出器出力で規格化する事により、UV レーザ自身の出力変動の影響が小さくなっている事が分かる。(c)は(b)の結果を透過率変化に直した結果とガウス分布によるフィッティング結果を示した。フィッティングの結果、オートコリレーション測定の半値幅は 9.9 ps であり、測定対象であるレーザー光がガウス分布をしていると仮定した場合のレーザーパルス長は 7.1 ps と計算される。

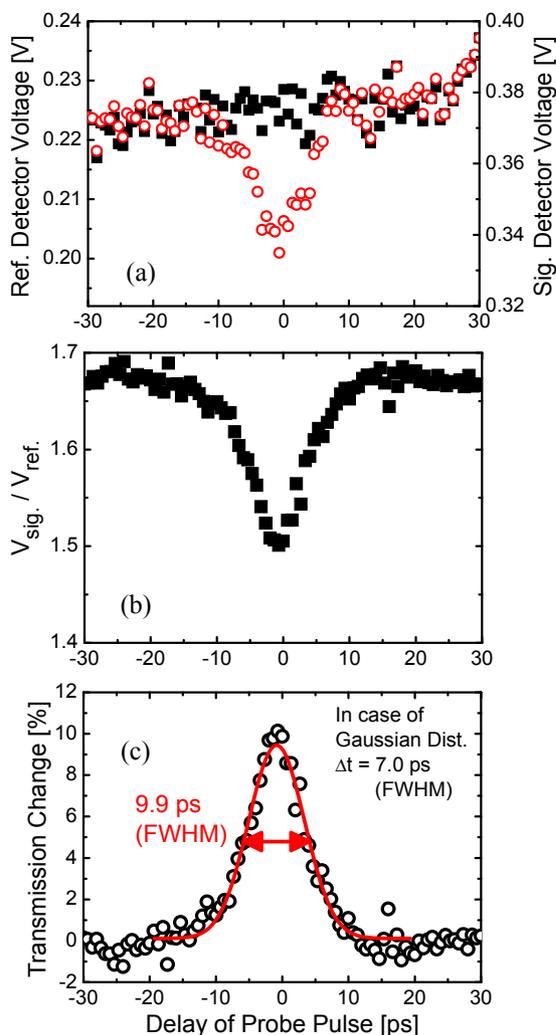


Figure 5: Typical measured results of autocorrelation measurement of UV ps-laser at KU-FEL with a 2-mm thick sapphire plate. (a) Recorded voltage of the reference detector and signal detector during a measurement. (b) Normalized voltage of the signal detector by the reference detector. (c) Measured transmission change as a function of temporal delay of probe pulse and fitting result.

上記の測定をサファイア基板の厚さ 1 mm、0.5 mm の場合にも行い、各基板厚みに対して 5 回同様の測定を行って得られた結果を Figure 6、Table 1 に示す。プロット点は 5 回測定の平均値、エラーバーは標準偏差を表す。サファイア基板の厚みが 0.5 mm の場合は非線形吸収量が小さく、S/N 比が悪い為、パルス長が長く、エラーバーが大きく測定された。サファイア基板 1.0 mm の場合の測定結果は測定の再現性が良く、エラーバーが小さい為、測定結果の信用性は高いと考えられる。サファイア基板の厚みが 1.0 mm の場合の測定結果は 2.0 mm の場合と比べ、1 ps 程短い。先行研究[4]では厚み 200 μm のサファイア、波長 266 nm の場合の理論上の最短測定可能パルス長は約 15 fs と見積もられており、10 倍の厚み 2.0 mm の場合では粗い見積もりでは 150 fs と推定される。今回、観測されたサファイア基板厚み依存性とは一致せず、先行研究[4]の理論計算ではサファイア基板中の波長分散によるパルス長伸長効果のみが考慮されており、その他の効果による寄与が無視できない為にこのような結果が得られたのではないかと推測される。

今回、測定されたパルス長は UV ピコ秒パルスレーザー発生に用いている Nd:YVO₄ モードロックレーザー発振器の発振パルス長仕様値 7.5 ps-FWHM に比べて少し短い値であった。4 次高調波までの波長変換の過程でパルス長が少し短くなったと考えられる。

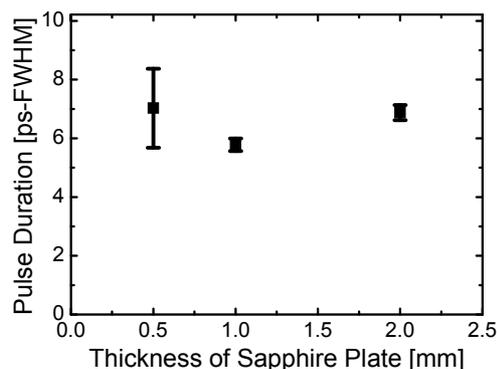


Figure 6: Measured pulse duration of UV ps-laser with different thickness of the sapphire plate.

Table 1: Measured Pulse Duration of UV ps-laser with Different Thickness of the Sapphire Plate

Thickness of Sapphire Plate	Measured Pulse Duration
0.5 mm	7.0 ± 1.3 ps
1.0 mm	5.8 ± 0.2 ps
2.0 mm	6.8 ± 0.3 ps

4.2 高ポンプ光強度での測定結果

ピコ秒 UV レーザ発生装置の条件を変化させ、UV レーザの強度を増加させると、オートコリレーション測定結果の形が大きく変化する。2mm 厚のサファイア基板を用いた場合の典型的な測定結果を Figure 7 に示す。サファイア基板に入射するポンプ光のパルスエネルギーが 18 μJ の条件下では前述の通り、ポンプ光とプローブ光がオーバーラップした条件下でのみ吸収が増加し、パルス長測定に適した条件が得られている。しかし、パルスエ

エネルギーが $28 \mu\text{J}$ になると、プローブパルスがポンプパルスよりも後に入射された場合、吸収が増えるという現象が観測された。さらにポンプ光のパルスエネルギーを増加させ、 $68 \mu\text{J}$ となると、プローブ光をポンプ光よりも前に入射した条件でプローブ光の透過率が增大するという現象が観測された。これらの現象が発生する原因は今後検討する予定であるが、現段階でこれらの観測結果から言える事はパルス長測定を行うためにはポンプ光強度を適切に調整する必要があるという事である。

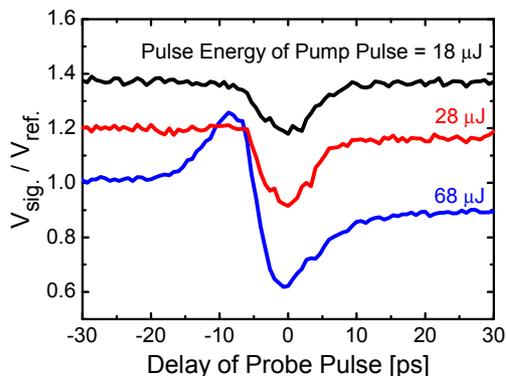


Figure 7: Autocorrelation results with different pump pulse intensity. The sapphire plate thickness was 2 mm in this measurement.

5. まとめ

光陰極高周波電子銃の光陰極励起に用いられる深紫外ピコ秒レーザーパルスのパルス長測定の為、サファイア基板中の 2 光子吸収を非線形現象として用いた深紫外オートコリレータを開発した。開発したオートコリレータを用いてこれまで京都大学エネルギー理工学研究所自由電子レーザー施設の光陰極高周波電子銃駆動に用いてきた深紫外ピコ秒パルスレーザーのパルス長測定を行った所、1 mm 厚のサファイア基板を用いた測定にお

いて $5.8 \pm 0.2 \text{ ps}$ という測定結果が得られた。サファイア基板の厚みが 2 mm の場合は $6.8 \pm 0.3 \text{ ps}$ と 1 ps 程長い結果であった。また、サファイア基板の厚みが 0.5 mm の場合は S/N が悪化し、測定パルス長が長く、エラーバーが大きい結果が得られた。

また、オートコリレーション測定でサファイア基板に入射するポンプ光強度が大きくなると、測定結果の形が大きく変化する結果が得られた。サファイア基板中の 2 光子吸収を非線形現象として用いた深紫外ピコ秒パルスレーザーのパルス長をオートコリレーションにより測定する場合はサファイア基板の厚みとレーザー高強度を適切に調整する必要がある事が実験的に示された。

今後、ポンプ光強度が大きい場合にサファイア基板中で何が生じているのかについて、調査を行う予定である。

謝辞

本研究は京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー複合機構センター共同研究の助成を受けて行われたものです。

参考文献

- [1] H. Zen *et al.*, Proceedings of IPAC2016, Pages 754-756 (2016); <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/mopow018.pdf>
- [2] S. Sikharin *et al.*, Proceedings of IPAC2016, Pages 1757-1759 (2016); <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/tupow008.pdf>
- [3] J. I. Dadap *et al.*, Optics Letters, 16, pp.499-501 (1991); <https://www.osapublishing.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-16-7-499>
- [4] C. Homann *et al.*, Applied Physics B, 104, 783 (2011); <http://link.springer.com/article/10.1007/s00340-011-4683-0>
- [5] H. Zen *et al.*, Proceedings of FEL2014, Pages 828-831 (2015); <http://epaper.kek.jp/FEL2014/papers/thp045.pdf>