

## 高繰り返し X 線チョッパーの開発

大沢仁志 (公財)高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1  
工藤統吾 (公財)高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1  
木村 滋 (公財)高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

**要旨** 高繰り返し再生増幅器によるパルスレーザー照射や高繰り返し電気信号入力によるポンププローブ時間分解測定法に向け、高い繰り返し性能を持つ X 線チョッパーの開発を行った。本チョッパーは 52 kHz と従来のチョッパーより高い繰り返し性能を持ち、上記の時間分解測定を高い効率で行うことが可能となった。本稿ではこの高繰り返し X 線チョッパーについて解説を行う。

### 1. はじめに

放射光のパルス性を利用したポンププローブ時間分解測定法は、シンクロトロンから発せられる X 線パルスの中から、試料への刺激（ポンプ）と同期した必要なタイミングの X 線パルスを選択する事によって、原理的に X 線パルス幅である数 10 ps までの時間分解能を達成できる測定手法である<sup>1)</sup>。この「必要な X 線パルスを選択」する手段としては、X 線パルスを分離可能な時間分解能を持つ検出器、例えばアバランシェフォトダイオード (APD) や PILATUS 等を使用し、電気回路系によって X 線パルスの選択を行う方法と、X 線チョッパーの様に必要な X 線パルスのみ切り出して試料に X 線を照射する方法の 2 方法が用いられている。X 線チョッパーによる X 線パルスの選択においては、電気回路による X 線パルス選択の様に検出器に時間分解能は必要とされず、通常測定に用いられている X 線検出器をそのまま使用して時間分解測定を行うことが可能であり、また、必要とされていない時間に X 線を照射することによる試料の放射線損傷の増大を防ぐことが出来るという利点がある。これらの利点により X 線チョッパーが「必要な X 線パルスを選択」する手法として多くの放射光施設で採用されている<sup>1-7)</sup>。

これまでに SPring-8 において導入されている X 線チョッパーでは、X 線切り出しの繰り返し周波数は 1 kHz に留まっていた（最高 3 kHz のチョッピングも可能な構造を持っているが<sup>1,3,4)</sup>）。この繰り返し周波数は導入当時の一般的な再生増幅器によるパルスレーザーによる繰り返し周波数を想定して設定されたものである。一方で、繰り返し周波数が数十～数百 kHz の再生増幅器を備えたパルスレーザーが近年発売され、さらに次世代メモリ素子などを対象に高速な電気信号入力を利用する実験が提案されるなど、より高い繰り返し周波数による X 線パルスの切り出

しが要求されてきている。我々は、この要望に応えるべく、より繰り返し周波数を高めることが可能な構造を持つ X 線チョッパーの開発を行った<sup>8)</sup>。

### 2. 高繰り返しかつ短時間の X 線チョッピングを可能とする X 線チョッパーの方式

高繰り返しの X 線パルスの切り出し (X 線チョッピング) には結晶やミラーを使う方法もあるが<sup>9,10)</sup>、この場合は X 線の方向や位置がチョッピング前後で変化することを避けることが出来ない。一方、X 線遮蔽体を利用して、必要なタイミングのみ X 線を通過させる方法の場合、X 線の位置も方向もチョッピングの前後で変化することではなく、実験上大変有利である。そこで、我々は X 線遮蔽体により X 線をチョッピングする方法を採用した。

Fig. 1 は X 線遮蔽体を回転させることにより機能する各種の X 線チョッパーの動作形式を示している<sup>4,6,8)</sup>。A は一般的な光学チョッパーに見られる形式であり、円周に設置されたスリットを持った X 線遮蔽円盤をモーターで回転させ、X 線をチョッピングしている。この方法では X 線はモーターの回転軸と平行であるため、‘parallel type’ と呼ばれる。この方法では X 線遮蔽円盤 1 回転に対して、1 つのスリットで 1 回の X 線チョッピングとなるが、多くのスリットを持たせることが容易であるため数十 kHz 以上の高繰り返しのチョッピングの達成が可能である。B では三角形の X 線遮蔽体の辺に X 線を通させるスリットを作成し、X 線をチョッピングしている。この方法は X 線と遮蔽体の回転軸は垂直であるため ‘perpendicular type’ と呼ばれている。A と同じく遮蔽体 1 回転に対して、1 つのスリットで 1 回の X 線チョッピングが可能であるが、三角形の遮蔽体の場合、遮蔽体 1 回転につき最高で 3 回の X 線チョッピングとなり、高繰り返しのチョ

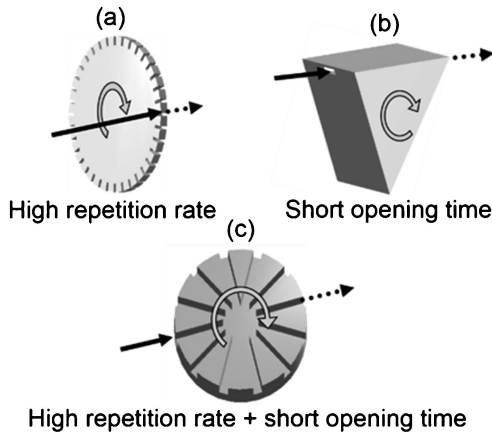


Fig. 1 Three typical X-ray chopping methods. ©(2017) The Japan Society of Applied Physics

ッピングは不可能であるため専ら数 kHz までのチョッピングに用いられている。一方、この方法では X 線に対しスリットは上流側，下流側とそれぞれ反対方向から閉じてゆくため，遮蔽体が A と同じスリットの大きさと回転速度と回転半径をもつとすると，A に比べて半分の時間の開口を実現することが可能となる。我々は A と B の利点を兼ね備えた C で示す形式を採用した。X 線と遮蔽体の回転軸は B と同じく垂直であるため，“perpendicular type”の利点である開口時間が短いという特徴を持つ。X 線遮蔽体は A と同様に円盤を採用しているが，A とは違い円周部を膨らませて，円盤の表面に円周から中心へ向かう方向に溝を掘り，X 線を通すスリットとしている。また遮蔽体の回転軸上に X 線を通す事により，遮蔽円盤 1 回転あたり 2 回 X 線を通過させることができるため，1 スリットあたり A や B の方法の 2 倍の X 線のチョッピング周波数を実現することができる。本方式は X 線のスリットを溝とすることで，容易にスリットを X 線遮蔽円盤上に作成することが出来るため，多くのスリットを必要とする高繰り返しな X 線のチョッピングには最適な方法であると考えている。

### 3. 高繰り返し X 線チョッパーの詳細

Fig. 2(a)は今回開発した X 線チョッパーの外観写真である<sup>8)</sup>。上部は X 線遮蔽円盤を納める円形チャンバーであり，後述する下部に設置されたエア軸受モーターによって X 線遮蔽円盤を回転させている。風損とそれに伴う回転ジッターを抑えるために X 線遮蔽円盤は真空中で回転させている。Fig. 2(b)は，上部のチャンバーを開けて撮影した X 線遮蔽円盤の写真である。X 線は矢印で示すように直径 140 mm の遮蔽円盤の中心を通るように入射する。高速回転を実現させるためには X 線遮蔽円盤は丈夫である必要があり，また，軸受の負担を軽減するために可能な限り軽い事が望まれる。この要求に応えることの出来る素材

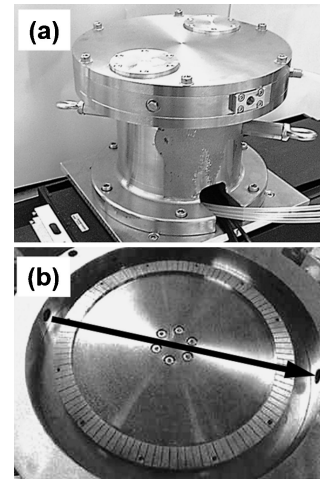


Fig. 2 Photograph of (a) the X-ray chopper apparatus and (b) the X-ray chopper disc. The arrow in (b) shows the X-ray path. ©(2017) The Japan Society of Applied Physics

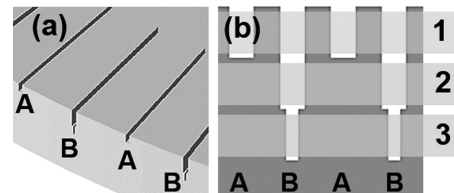


Fig. 3 (a) Computer graphic diagram of the groove structure on the chopper disc in Fig. 2(b). (b) Schematic drawing of groove design on chopper disc. ©(2017) The Japan Society of Applied Physics

としてはチタンやアルミ合金をあげることが出来る。今回の X 線チョッパーは 30 keV 程度の高エネルギー X 線への利用を考え，X 線遮蔽円盤の素材にアルミ合金に比べて X 線阻止能の高いチタンを採用している。X 線遮蔽円盤の円周部には Fig. 3 に示すように，円周部に遮蔽円盤の中心に向かって A と B と深さと幅の違ったスリットがそれぞれ 27 ペアずつ等間隔に設置されている。A のスリットサイズは深さ 500  $\mu\text{m}$ ，幅 250  $\mu\text{m}$  である。B は深さ 1 mm までは幅 250  $\mu\text{m}$  と A と同じであるが，深さ 1 mm から 1.5 mm の部分の幅を 110  $\mu\text{m}$  としている。この X 線遮蔽円盤を SPring-8 と同期した 473.38 Hz で回転させた場合，幅 250  $\mu\text{m}$  の部分では 1,170 ns，幅 110  $\mu\text{m}$  の部分では 520 ns の開口時間を得られるため，前者は 5 bunches + 1/7 filling mode (バンチ間隔 684 ns)<sup>11)</sup>時，後者は 12 bunches + 1/14 mode (バンチ間隔 342 ns)<sup>11)</sup>時にシングルパルス X 線を切り出すことが可能である。この様に 2 種類の構造の異なるスリットを持つことにより，本チョッパーでは 2 種類のチョッピング周波数と開口時間にて使用することが可能となっている。Fig. 3(b)の 1 で示すスリットの深さ 500  $\mu\text{m}$  までを使用した場合，A と B のスリットを両方使用することになり，SPring-8 4 周に 1 回の 52.2 kHz のチョッピング周波数で機能し，Fig. 3(b)の 2, 3 の

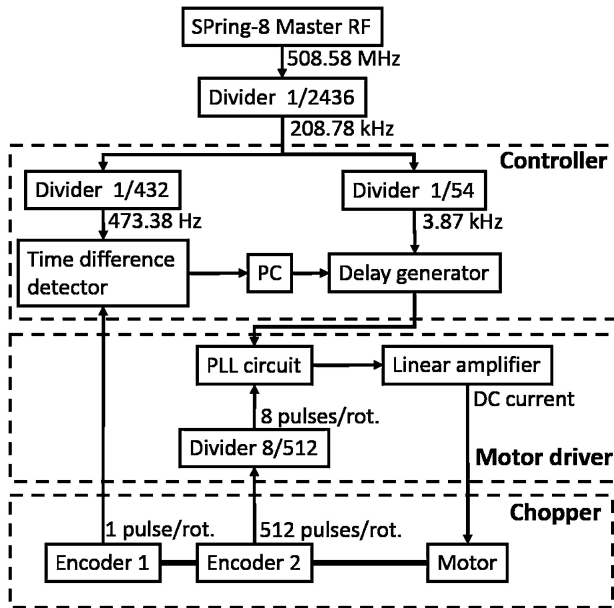


Fig. 4 Block diagram of X-ray chopper control system.

様に深さ500  $\mu\text{m}$  から深い部分を利用した場合、Bのスリットのみが使用され SPring-8 8 周に1回の26.1 kHzのチョッピング周波数で機能する。さらに Fig. 3(b)の3で示す深さ1 mm より深い部分を利用した場合は、より狭い開口時間にてチョッピングを行うことが可能となる。

上記のデザインの X 線遮蔽円盤を回転させて所定の性能を発揮させるためには、X 線遮蔽円盤を SPring-8 と完全に同期させて回転させる必要がある。より高回転のモーターを採用することにより、より高繰り返しでスリット幅を広く設定した X 線チョッピングを実現できることから、今回の開発においては X 線遮蔽円盤を回転させるためのモーターとして、最高回転数波数が500 Hz であるエア軸受モーター（新明和工業 SPM30）を採用した。このエア軸受モーターを Fig. 4 に示す回路系を用いてモーターの回転速度と位相を SPring-8 に同期させ、X 線チョッパーとして機能するようにしている。モーターには2種類の出力を持つ回転エンコーダーが取り付けられており、それぞれモーター1回転につき1パルス（Encoder 1）、512パルス（Encoder 2）を出力する。Encoder 2はモータードライバー内で64分周され、モーター1回転につき8パルスの信号として変換される。SPring-8の基準RF信号を131,544分周して作成された、モーター1回転につき8パルスにあたる信号（制御信号：3.87 kHz）と、上記の分周された Encoder 2からの信号の時間差をモータードライバー内のPLL回路にて検知し、それぞれの時間差が一定になるようにモーターに印加する電流を制御している。これにより、モーターは制御信号、すなわち SPring-8 と同期した回転速度と位相にて動作することが可能となる。モーターは制御信号に追従した位相で回転しているので、コントローラー内の Delay generator にて制御信号の

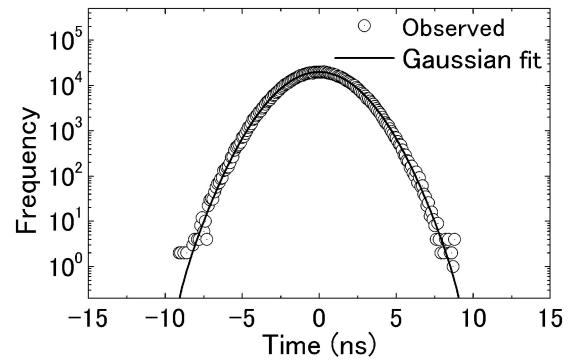
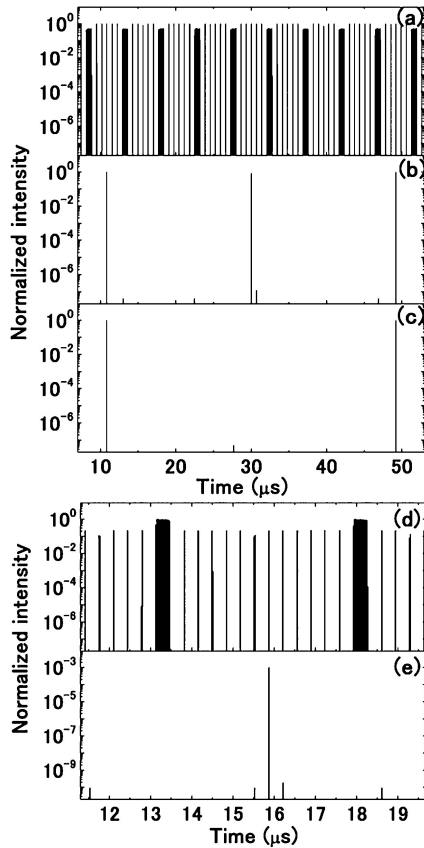


Fig. 5 Observed jitter of motor rotation vs. SPring-8 master RF.

位相を動かすことにより目的の X 線パルスをチョッピングするよう X 線チョッパーのタイミングを調節することが出来る。先程、本エア軸受モーターの最高回転数波数は500 Hz であると述べたが、これは Encoder 2の最高動作周波数の制限からくるものである。Encoder 1はこれと同期するように SPring-8の基準RF信号を1,052,352分周して作成された信号に対する時間差を数秒に1回観察することによりドリフトや回転異常の監視を行うことに使用されている。これらの制御により Fig. 5 に示す様に SPring-8 基準信号に対するジッターの半値幅4 ns、全幅が20 ns 以内と非常に安定したモーターの同期運転が実現されている。

#### 4. 高繰り返し X 線チョッパーの性能

Fig. 6(a)–(c)は、5 single bunches+1/7 filling mode 時に、(d), (e)は12 single bunches+1/14 filling mode 時に行った X 線チョッパーの動作試験の結果である<sup>8)</sup>。動作試験は SPring-8 BL13XU にて行った。高さ400  $\mu\text{m}$ 、幅250  $\mu\text{m}$  をもつ12.4 keV の X 線をチョッパーに入射した。チョッパーを通過した X 線を銅板にあて、散乱 X 線と蛍光 X 線を APD にて検出し、マルチチャンネルスケーラーにより時間スペクトルを測定した。Fig. 6(a)はチョッピングを行う前に測定される X 線の時間構造であり、5 single bunches+1/7 filling mode 時に特有な684 ns の間隔を持つ5個のシングルパルス X 線と、全周で100 mA の電流蓄積量を保つための連続部分からなる X 線が観察されている。Fig. 6(b)はチョッパーを動作させ、Fig. 3(b)中1で示される部分に X 線を通過させた際に観察された X 線の時間構造である。SPring-8 4 周に1パルスのみの X 線がチョッパーを通過し、他の部分はチョッパーにより阻止される様子が示されている。Fig. 6(c)は X 線チョッパーの高さを500  $\mu\text{m}$  上げ、Fig. 3(b)中2の部分に X 線を通過させた際に観察された X 線の時間構造である。Fig. 6(b)の半分、すなわち SPring-8 8 周に1回のチョッピングがなされている事が観察されている。Fig. 6(d), (e)は12 single bunches+1/14 filling mode 時に観察した X 線チョッピングの結



**Fig. 6** Time structure of X-ray pulses obtained (a) and (d) before and (b), (c) and (e) during chopping with zone 1, 2 and 3 shown Fig. (b). (a)-(c) and (d)-(e) were observed in 5 single bunches + 1/7 filling mode and 12 single bunches + 1/14 filling mode. © (2017) The Japan Society of Applied Physics

果である。バンチ間隔は342 ns と 5 single bunches + 1/7 filling mode 時半分となるが、**Fig. 3(b)**中3の部分にてX線をチョッピングさせることにより**Fig. 6(e)**に示すようシングルバンチのみを得ることに成功している。今回開発したX線チョッパーでは、チョッピング対象のX線パルスに対し、対象としないX線を1/1000000オーダーで遮蔽することが可能であり、多くの時間分解測定において十分なチョッピング性能を持っていると考えている。

## 5. まとめ

我々は電気刺激や将来の高繰り返しパルスレーザーによる時間分解測定に使用する事を目的とし、SPring-8 4周に1回までの高繰り返し周波数を持つ、X線チョッパーの開発を行った。本チョッパーは従来のチョッパーに比べ高繰り返しであり、X線の利用率は高く、従来は非現実的であった偏向電磁石ビームラインにおけるシングルパルスX線を用いた時間分解測定も可能としている。このため、現在では本チョッパーはSPring-8 BL02B1に設置され、電場印加時間分解高エネルギーX線回折実験に使用

されている<sup>12,13</sup>。また本チョッパー設計時から時が経ち、シングルバンチ電流が5 mAとより高く、バンチ間隔も広がった運転モード(1 bunch + 11/22 filling: バンチ間隔1486 ns)<sup>11</sup>による運転もなされるようになったことから、2017年現在、本チョッパーは、このバンチモード向けに改造中である。改造後は69.7 kHz, 34.8 kHz, 2.8 kHzと3種類の幅の広い繰り返し周波数にて利用が可能となり、同時にスリット幅を広げることにより2倍のX線強度を得られる予定である。

今回紹介したX線チョッパーをベースとして、20 keV以下をターゲットとしたアルミ合金製のX線遮蔽円盤を持つ縦にX線遮蔽円盤を回転させるチョッパーや、軟X線ビームライン向けの高真空タイプのチョッパーの開発も進めている<sup>14</sup>。また、より多くのビームラインにおける時間分解測定を可能とするために、性能は劣るがより小型で安価なX線チョッパーの開発も行っており、いつかのビームラインにおいて使用されてきている<sup>15</sup>。これらのX線チョッパーを適切に使い分けることにより様々な時間分解測定を行うことが可能となると考えている。

## 参考文献

- 1) 足立伸一, 田中義人: 放射光 **20**, 117 (2003).
- 2) A. McPherson, J. Wang, P. L. Lee and D. M. Mills: J. Synchrotron Rad. **7**, 1 (2000).
- 3) S. Adachi, K. Inoue, T. Oka, N. Yagi, Y. Tanaka, T. Ishikawa and Y. Shiro: AIP Conf. Proc. **705**, 1383 (2004).
- 4) M. Cammarata, L. Eybert, F. Ewald, W. Reichenbach, M. Wulf, P. Anfinrud, F. Schotte, A. Plech, Q. Kong, M. Lorenc, B. Lindenau, J. Rábiger and S. Polachowski: Rev. Sci. Instrum. **80**, 015101 (2009).
- 5) M. Gembicky, D. Oss, R. Fuchs and P. Coppens: J. Synchrotron Rad. **12**, 665 (2005).
- 6) M. Gembicky and P. Coppens: J. Synchrotron Rad. **14**, 133 (2007).
- 7) A. Meents, B. Reime, M. Kaiser, X.-Y. Wang, R. Abela, E. Weckert and C. A. Schulze-Bries: J. Appl. Crystallogr. **42**, 901 (2009).
- 8) H. Osawa, T. Kudo and S. Kimura: Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 048001 (2017).
- 9) R. Tucoulou, D. V. Roshchupkin, O. Mathon, I. A. Schelokov, M. Brunel, E. Ziegler and C. Morawe: J. Synchrotron Rad. **5**, 1357 (1998).
- 10) A. Siria, O. Dhez, W. Schwartz, G. Torricelli, F. Comin and J. Chevrier: Nanotechnology **20**, 175501 (2009).
- 11) web page: [http://www.spring8.or.jp/users/operation\\_status/schedule/bunch\\_mode](http://www.spring8.or.jp/users/operation_status/schedule/bunch_mode)
- 12) H. Osawa, T. Ohkouchi, M. Fujisawa, S. Kimura and T. Kinoshita: J. Synchrotron Rad. **24**, 560 (2017).
- 13) S. Aoyagi, H. Osawa, K. Sugimoto, A. Fujiwara, S. Takeda, C. Moriyoshi and Y. Kuroiwa: Appl. Phys. Lett. **105**, 201905 (2015).
- 14) S. Aoyagi, H. Osawa, K. Sugimoto, S. Takeda, C. Moriyoshi and Y. Kuroiwa: Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 10TC05 (2016).
- 15) C. Moriyoshi, S. Hiramoto, H. Ohkubo, Y. Kuroiwa, H. Osawa, K. Sugimoto, S. Kimura, M. Takata, Y. Kitanaka, Y. Noguchi and M. Miyayama: J. Jpn. Appl. Phys. **50**, 09NE05 (2011).

● 著者紹介 ●

**大沢仁志**

公益財団法人高輝度光科学研究センター  
研究員

E-mail: hitoshio@spring8.or.jp

専門：放射光を利用した時間分解測定法の開発

**【略歴】**

2003年9月総合研究大学院大学数物科学研究科博士課程修了。博士(理学)。東京大学物性研究所博士研究員、高輝度光科学研究センター博士研究員を経て2008年10月より現職。

**工藤統吾**

公益財団法人高輝度光科学研究センター  
主幹研究員

E-mail: kudo@spring8.or.jp

専門：回路技術などをベースとした放射光技術分野での装置開発

**【略歴】**

1989年筑波大学大学院修士課程医科学研究科学修了，医科学修士。2007年総合研究大学院大学より博士(工学)授与。住友製薬株式会社（現：大日本住友製薬株式会社），ツジ電子株式会社をへて1996年から高輝度光科学研究センター。2012年～2015年理化学研究所，2016年4月より現職。

**木村 滋**

公益財団法人高輝度光科学研究センター  
利用研究促進部門 副部門長

E-mail: kimuras@spring8.or.jp

専門：材料評価，精密 X 線回折

**【略歴】**

1994年名古屋大学大学院工学研究科応用物理学専攻博士課程終了，博士(工学)。NEC 基礎研究所，マイクロエレクトロニクス研究所，シリコンシステム研究所を経て，2002年9月より高輝度光科学研究センター主幹研究員。2015年4月より現職。

## Development of high repetition rate X-ray chopper system

**Hitoshi OSAWA** Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Sayo, Hyogo 679-5198, Japan  
**Togo KUDO** Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Sayo, Hyogo 679-5198, Japan  
**Shigeru KIMURA** Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Sayo, Hyogo 679-5198, Japan

**Abstract** The high repetition rate X-ray chopper system has been developed for pump-probe time-resolved measurements. This chopper system has high repetition rate of 52 kHz, which is much higher than the already established choppers. This enables highly efficient pump-probe measurements for high repetition amplified pulse laser and/or electric signal stimulations.