

# THz FEL からの単一パルスの取り出しのためのプラズマスイッチの研究

## STUDY OF PLASMA SWITCH FOR SINGLE PULSE EXTRACTION FOR THE THz FEL

川瀬啓悟<sup>#, A)</sup>, 菅田義英<sup>B)</sup>, 磯山悟朗<sup>B)</sup>  
Keigo Kawase<sup>#, A)</sup>, Yoshihide Honda<sup>B)</sup>, Goro Isoyama<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> QST

<sup>B)</sup> The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

### Abstract

A free electron laser (FEL) oscillator generates intense lights by successively amplifying the lights through the FEL interaction inside the optical resonator. Although the lights extracted from the resonator in general consist of a pulse train with the duration of a few microseconds, there is some requirement to use a single pulse. Thus, we are conducting to develop the single pulse extraction with the reflective switch consisting of the laser induced plasma on the surface of a semiconductor wafer. In this study, we are experimentally evaluating characteristics of the semiconductor reflective switches for the different semiconductors and the different laser irradiances. We report the summary of the experimental results up to now.

### 1. はじめに

大阪大学産業科学研究所量子ビーム科学研究施設に設置されているLバンド電子ライナックを用いたテラヘルツ領域の自由電子レーザー(産研 THz FEL)は、繰り返し27 MHzで8 μsの間発生するエネルギー15 MeVで電荷量4 nC、rmsバンチ長20 psの電子ビームを5 Hzの間欠運転で5.531 mの光共振器に挟まれた長さ1.92 m、周期長60 mmの磁極ギャップ可変の平面アンジュレータに通すことでテラヘルツ領域の狭帯域コヒーレント光パルスが発生させる装置である。利用できる光の波長範囲は40 - 110 μmで、最大のパルスエネルギーは200 μJを超える。このFELは実効的に150 - 200個の光パルス(マイクロパルス)が27 MHz間隔の列(マクロパルス)となって発生し、利用される[1]。

産研 THz FELのマイクロパルスのピークパワーは10 MWを超える一方、すべてのマイクロパルスのエネルギーを合わせたマクロパルスの熱量は30 mJを超える。そのため、照射実験においては、アブレーションなどの高強度性に対する応答と、溶融などの高熱量性に対する応答との双方の効果が合わせて結果に影響する場合があります。高強度性に対する応答を議論する上で、困難を生ずる。そこで本研究では、27 MHzの光パルス列の中から1つのパルスのみを取り出す方法として、高強度レーザーで駆動する半導体反射スイッチを導入し、その動作特性を評価した。本報告では、その概要とこれまでの計測結果のまとめを提示する。

高強度レーザーで駆動する半導体反射スイッチの歴史は古く、1975年にAlcockらによりCO<sub>2</sub>レーザーの切り出しについての研究報告の後[2]、中遠赤外領域のCWレーザーのパルス化研究が進められてきた[3]。その後、多くの中遠赤外 FELでの応用研究も実施されている[4 - 7]。

反射スイッチの原理は、中遠赤外領域において透過性の良い鏡面仕上げの半導体基板にバンドギャップを

超える波長の高強度レーザーを照射して半導体表面に電子ホールプラズマを形成することで、高プラズマ密度時のみ、中遠赤外光を反射させるというものである。このプラズマの緩和時間が短い半導体を選択することで、FELパルス列から単一のパルスのみを反射させて取り出すことができる。本研究では半導体基板としてGaAsを選択し、励起レーザーとしてパルス幅100 fs、パルスエネルギー1 mJのチタンサファイアレーザーを利用した。また比較のためにSi基板についてもスイッチ特性の評価を実施した。

### 2. 実験セットアップ

THz FELは真空の伝送路からダイヤモンド窓を透過して利用される。取り出されたTHz FELはワイヤーグリッド偏光子で水平偏光のみとし、2つの軸外し放物面鏡でダウンコリメートする。その後、半導体基板へはプリユスター角で入射し、非スイッチ時の反射強度を最小とする。THz FELのビームプロファイルは、半導体基板を設置する前に、テラヘルツカメラ(IRV-T0831, NEC)を用いて測定した。

励起レーザーは光学遅延ステージを通り、1/2波長板と偏光ビームスプリッターから成る減光系を透過した後、半導体基板へ照射される。照射位置でのレーザープロファイルは基板上にターゲット(方眼紙)を置き、その照射像をCMOSカメラで撮像した。

スイッチされたTHzパルスや半導体を透過するTHzパルスの計測には、エネルギーメータ(J25 および J10, Coherent Inc.)や高速応答の焦電素子検出器(P5-00, Molelectron Inc.)を利用した。

THzパルスと励起レーザーパルスとのタイミングは、P5-00検出器とフォトダイオードを用いてオシロスコープで確認し、光学遅延ステージで調整した。

### 3. 実験結果

波長71.5 μmのFELパルス列に対して、GaAs基板表面へのチタンサファイアレーザーの照射フルエンス

<sup>#</sup> kawase.keigo@qst.go.jp

0.31 mJ/cm<sup>2</sup> で反射スイッチとしたところ、単一パルスの切り出しを確認した。GaAs を透過した FEL のパルス列波形を Fig. 1 に示す。スイッチタイミング時に透過波形パルス波高がほぼ、バックグラウンドと同等になっていることがわかる。透過光のマクロパルスエネルギーで波高ピーク値を較正し、基板吸収率 0.3 を考慮した結果、この時の反射率は0.8以上であると評価でき、10 μJ の単一 THz パルスを切り出すことができた。

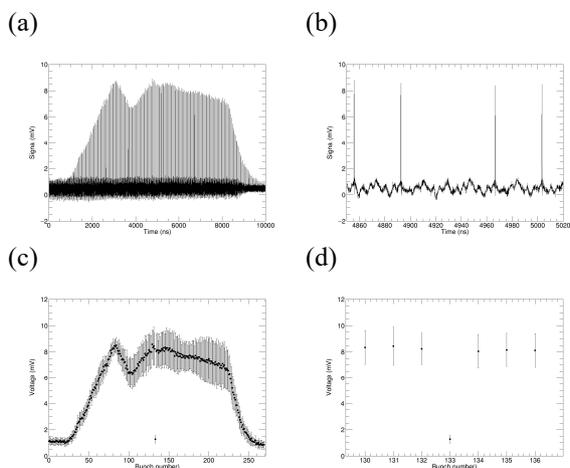


Figure 1: (a) macropulse waveform of the THz FEL transmitted through the GaAs wafer when the switching is operated. (b) enlarged at the switch timing. (c) and (d) are plots of the extracted peak values.

チタンサファイアレーザーの照射フルエンスを変えた時のパルス反射率変化の測定結果を Fig. 2 に示す。この結果より、0.1 mJ/cm<sup>2</sup> で反射率の飽和が見られる。

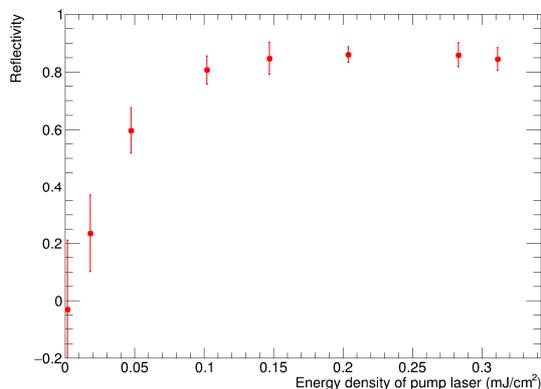


Figure 2: Reflectivity dependence on the irradiation fluence.

GaAs と同様の反射スイッチ試験を Si 基板に対しても実施した。GaAs と異なり自由キャリア寿命の長い Si の場合、37 ns 間隔のパルス列が数パルスで減衰しながら反射されることを確認した (Fig. 3)。一方、透過波形は、透過強度の回復が緩やかで数 ms では回復しないということが確認された。この Si における遅い緩和に関する詳細

な研究は今後の課題である。

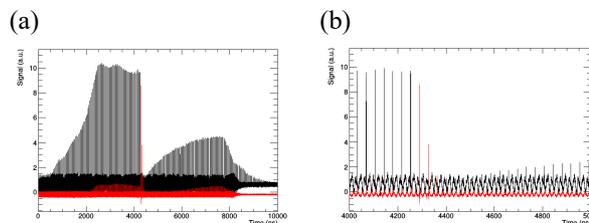


Figure 3: (a) macropulse waveform of the transmitted (black) and reflected (red) pulses on the Si wafer at the switch timing and (b) enlarged.

#### 4. まとめ

本研究では、GaAs をスイッチ基板として 27 MHz で繰り返される THz FEL のパルス列から単一の THz パルスを取り出すことができることを実証した。スイッチ反射率は波長 71.5 μm において 80%以上を得ており、光学系の見直しと乾燥環境下とすることにより、100 μJ を超える単一 THz パルスの利用が期待できる。また Si と比較することで、半導体のキャリア寿命により THz パルス列の反射、透過および吸収が大きく異なることがわかった。このことを用いて、様々な半導体表面において高強度レーザーを照射により形成した電子ホールプラズマの緩和についての THz パルス列をプローブとした詳細な研究につながることを期待している。

#### 謝辞

本研究の一部は、科研費 (24310069, 15K13407, 20K12491) からの助成を受けて実施している。

#### 参考文献

- [1] K. Kawase *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. In Phys. Res. A 960 (2020) 163582.
- [2] A.J. Alcock *et al.*, Appl. Phys. Lett. 27, 680 (1975).
- [3] H. Salzmann *et al.*, Opt. Commun. 47, 340 (1983).
- [4] J. P. Kaminski *et al.*, Appl. Phys. Lett. 57, 2770 (1990).
- [5] E.H. Haselhoff *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. A 358, ABS 28 (1995).
- [6] X. Wang *et al.*, Appl. Phys. Lett. 103, 191105 (2013).
- [7] J. Schmidt *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 86, 063103 (2015).