

相対論的ドップラー反射によるテラヘルツ光の高周波数シフト

Frequency up-shifter for THz light via relativistic Doppler reflection

○河野 七瀬、板倉 隆二、坪内 雅明 (日本原子力研究開発機構)

○Nanase Kohno, Ryuji Itakura, Masaaki Tsubouchi (Japan Atomic Energy Agency)

E-mail: kono.nanase@jaea.go.jp

実験室レベルで高強度テラヘルツ(THz)光を発生させる手法として非線形光学結晶を用いた光整流法が広く使用されている。しかし、上記の手法では、発生する THz 光の周波数が用いる結晶の特性や、励起レーザーのパルス幅・帯域に依存しており、周波数領域を制御するのは実験装置の大幅な変更が必要であるため容易ではない。近年、Roskos らは相対論的なドップラー反射を用いることで THz 光の高周波数シフトが達成されることを理論計算により導き¹、続いてそれを実証した²。Fig. 1 (a)に原理を示す。励起光を Si に照射すると Si 表面に光誘起キャリアが発生する。ここで THz 光を対向に照射すると、キャリアがプラズマミラーとして働き、THz 光は反射される。光誘起キャリアは励起光の浸透とともに生成されるため、キャリアの膜は励起光と同じ速度で Si 内に進行する。そのため、THz 光は自身の方へ動いているミラーによりドップラー反射され、高周波数シフトする。本研究では、上記のドップラー反射法を用いた THz 光の高周波数シフトに対する励起光の強度および波長依存性について調査した。

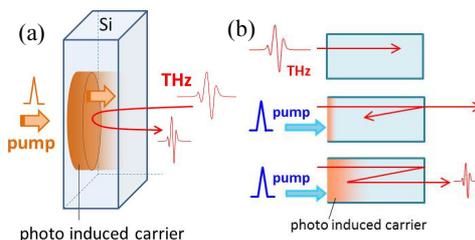


Fig. 1. (a) Principle and (b) Schematic diagram of the relativistic Doppler reflection in Si for THz light.

本実験では、励起光として波長 800 nm (Ti:Sa, 1 kHz, 50 fs, 1.5 mJ) のフェムト秒パルス光を用いた。THz 光の検出を容易にするため、THz 光と光誘起キャリアとの相互作用を反射型(Fig. 1 (a))ではなく、Fig.1 (b)に示す透過型のスキームで観測した³。THz 光を Si に照射すると、裏面反射により一部の THz 光が再び Si 表面に戻る。この時、THz 光が Si 表面に到達する前に励起光を照射すると、Si 表面にキャリアが発生し、THz 光がプラズマミラーにより反射される。

Figure 2(a) に励起光強度 $3.8 \mu\text{J mm}^{-2}$ の時に観測した反射 THz 光スペクトルの時間変化を示す。横軸は、励起光に対する THz 光の照射遅延時間(Δt)を表す。裏面反射した THz 光と励起光が Si 表面に同時に到達する時刻を $\Delta t = 0$ とした。 Δt が十分に負の時間領域では、励起光の影響がないため THz 光は Si 表面でフレネル反射している。続いて、 $\Delta t = 0$ 付近では THz 光強度の減衰が観測された。これは、励起光パルスの裾が Si 内部に浸透し始め、低い濃度のキャリアが表面付近で発生したことで THz 光が低濃度プラズマにより吸収されたためと考えられる。 $\Delta t \geq 0$ では十分に密度の高いキャリアが発生し、THz 光がプラズマ反射されるため、再び反射 THz 光が観測された。そして、遅延時間 1 ps 付近で、高周波数シフトした成分が観測された(Fig. 2 (a), 点線部分)。さらに時間が経過すると($\Delta t \gg 0$)、高周波数成分は消失した。これは、励起光が完全に Si に吸収された後に存在する静的なキャリア膜により、通常のプラズマ反射が起こるためである。

Figure 2(b)に、プラズマ反射した THz 光の平均周波数時間変化を、4 つの励起光強度で観測した結果を示す。 $1.3 \mu\text{J mm}^{-2}$ 以上の励起光強度で高周波数シフトが観測された。また、閾値以上では励起光の強度に依らず、平均周波数は、励起光を照射しなかった場合(Fig. 2 (b), 黒点線)に比べて、最大およそ 1.4 倍に増加した。これは、シフト量がキャリア密度には依存しないことを表しており、Si 内での励起光すなわちプラズマミラーの速度のみに依存することを示している。この結果は、低い励起光強度でも容易に高周波数シフトが達成されることを示唆しており、今後 THz 領域で周波数制御する光学素子等への応用が期待される。また、発表当日は励起光の波長依存性についても報告する。

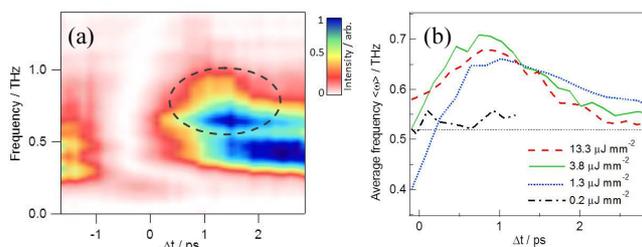


Fig. 2. (a) THz delay (Δt) dependence of THz spectra. (b) Average frequency of the reflected THz light as a function of the THz delay.

【参考文献】[1] M. D. Thomson, *et al.*, *Phys. Rev. B*, vol. 87, pp. 085203, 2013. [2] F. Meng, *et al.*, *Phys. Rev. B*, vol. 90, pp. 155207, 2014. [3] M. Tsubouchi, *et al.*, *Opt. Lett.*, vol. 37, pp. 3528–3530, 2012.