

京都大学大学院理学研究科 永井 正也

超短パルス光を用いた高強度テラヘルツ光は、大きな照射スポットサイズが必要なイメージングや高い電場強度が求められる非線形分光にとって非常に重要である。これまで実励起キャリアによる電流を用いた発生方法においては磁場印加によって表面電流の向きを変えて外に出力する効率を上げたり[1]、キャリア吸収の飽和を避けるために光伝導アンテナの大口径化[2]などによって高出力化が行われてきた。一方で非共鳴の非線形光学応答を用いた発生手法は変換効率こそ低いものの、高強度光パルス入射でも飽和が起きない利点がある。またガスを用いた高強度励起でのテラヘルツ放射も報告されているが[3,4]、ここでは非線形結晶を用いたテラヘルツ発生を取り上げる。

一般に非線形結晶に求められる条件は高い非線形光学定数や損傷閾値を持ち、媒質の吸収が小さいことである。結晶が有限の厚さを持つ場合は加えて位相整合条件が発生効率に大きく寄与する。励起光パルスに伴う非線形分極すなわち光源の（群）速度と発生したテラヘルツ光の位相速度が一致した場合 ( $n_g = n_{\text{THz}}$ ) には各々の場所からテラヘルツ光は効率よく重ね合わせられる。図1は閃亜鉛型結晶構造を持つ半導体のコヒーレンス長を示している[5]。位相整合条件から見ると  $0.8\mu\text{m}$  のチタンサファイヤレーザーでは ZnTe や GaP、 $1.04\mu\text{m}$  の Yb ドープファイバーレーザーでは CdTe や GaP が非線形媒質として適しているのが分かる。高出力チタンサファイヤレーザーと ZnTe 結晶を組み合わせることで  $1.5\mu\text{J}$  のテラヘルツ波発生が報告されている[6]。

発生効率は一般に2光子吸収による発生効率の飽和で制限される。バンドギャップの大きな  $\text{LiNbO}_3$  などは2光子吸収が生じにくい上に大きな電気光学定数を持つために、高強度のテラヘルツ波発生が期待できる。しかし強い分散のために位相整合条件が満たされず、周期的ドメイン反転構造による擬似整合を施す必要がある。しかし小さなビーム径で励起光を入射すると励起波束が伝播すると非同軸での輻射が起こる。これはもともとナノ秒パルス励起で行われている非同軸のパラメトリック過程[7]の位相整合条件と同じであり、荷電粒子が媒質中を伝播する際に生じるチェレンコフ光として近似したものである[8]。励起光に対して放射角  $\theta$  でテラヘルツ光が放射されるとすると、位相整合条件は  $n_g = n_{\text{THz}} \cos \theta$  と書き表される。

この非同軸放射光の伝播に追従するように同位相の非線形分極すなわち励起光パルスの波束面を空間的に制御してやれば、テラヘルツ光が効率よく重ね合わせることができる [9]。このような手法はヘブリングらによって提案され、近年では発生効率が  $5 \times 10^{-4}$ [10]、出力が  $10\mu\text{J}$  を超えている[11]。図3は同様の手法で発生させたテラヘルツ光の電場波形であり、その電場の最大値は  $200\text{kV/cm}$  近くに達する[12]。

これらの手法での変換効率は1に近い量子効率を実現している。量子カスケードレーザーが1電子から多くのテラヘルツ光子を放出することで高効率化が実現したように、非線形光学過程においても1光

子の励起光から多くのテラヘルツ光の光子をいかに放出させることができるかが鍵となる。

本研究は科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業さきがけプログラム、並びに総務省戦略的情報通信研究開発推進制度の援助を受けて行われた。

**[参考文献]**

- [1] N. Sarukura et al. J. Appl. Phys. **84**, 654 (1998)
- [2] E. Budiarto et al. IEEE J. Quantum Electron. **32**, 1839 (1996).
- [3] T. Bartel et al. Opt. Lett. **30**, 2805 (2005).
- [4] K.-Y. Kim et al. Opt. Express **15**, 4577 (2007).
- [5] M. Nagai et al., Appl. Phys. Lett. **85**, 3974 (2004).
- [6] F. Blanchard et al. Opt. Lett. **30**, 2805 (2007)
- [7] K. Kawase et al. Appl. Phys. Lett. **80**, 195 (2002).
- [8] D. H. Auston, Appl. Phys. Lett. **43**, 713 (1983),
- [9] J. Hebling et al. Opt. Express, **15**, 13212 (2002)
- [10] G. Stepanov et al. Opt. Express **13**, 5762 (2005)
- [11] K.-L. Yeh et al. Appl. Phys. Lett. **90**, 171121 (2007).
- [12] 永井他 第 55 回応用物理学関係連合講演会 30p-ZH-6 (2008)

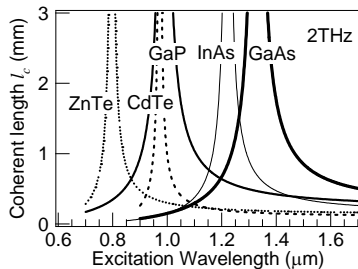


図 1：様々な閃亜鉛鉱型半導体におけるテラヘルツ波発生時の 2 THz でのコヒーレント長。

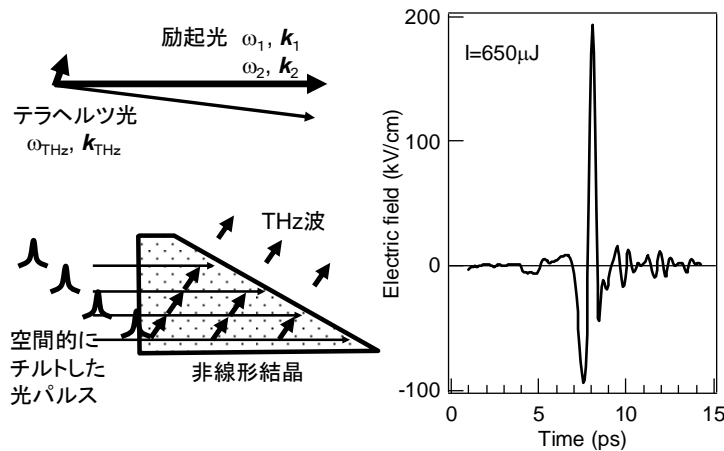


図 2：高屈折率媒質における非同軸テラヘルツ波発生（左）とその電場波形（右）。