

小型チップ状 THz 光発生デバイスの開発

坪内雅明、永島圭介、越智義浩、圓山桃子

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所

tsubouchi.masaaki@qst.go.jp

近年高強度 THz 光発生法として、超短パルス光の非線形光学結晶への照射による光整流法が広く用いられている。本手法では、非線形光学定数が大きくかつバンドギャップが大きい非線形結晶と、適切な励起光源の選択が必要となる。現在比較的容易に利用可能な超短パルス励起光源として、Ti:Sapphire レーザー（波長 800 nm, パルス幅 100 fs 程度）と、Yb 系レーザー（波長 1 μm , パルス幅 1 ps 程度）が用いられている。これらを励起光とした場合、LiNbO₃ (LN) 結晶が最適な非線形光学結晶の 1 つとして挙げられる。しかし LN 結晶は、励起光とテラヘルツ光の屈折率が大きく異なるため光整流過程の位相整合条件を満足せず、励起光を直入射するだけでは高い THz 光発生効率は期待できない。

そこで Hebling らは「波面傾斜法」を提案し、LN 結晶によるテラヘルツ光発生効率の劇的な向上に成功した[1]。本手法では図 1 (a)に示す様に励起光の波面をチェレンコフ角

$$\theta_c = \cos^{-1} \left(\frac{n^{gr}}{n_{\text{THz}}} \right) : n^{gr} \text{ は励起光の群屈折率、} n_{\text{THz}} \text{ は THz 光の屈折率} \quad (1)$$

だけ傾ける事により励起光の波面とテラヘルツ光の波面を揃え、擬似的な位相整合条件を成立させる。本手法は 2002 年に提案された後すぐ同グループにより実証され[2]、その後 Nelson らによる最適化により 2007 年には 10 Hz の繰り返し周波数で 10 μJ [3]、翌年に繰り返し 1 kHz で 3.3 μJ [4]の出力が実現され、従来法に比べて飛躍的にテラヘルツ光出力が向上した。

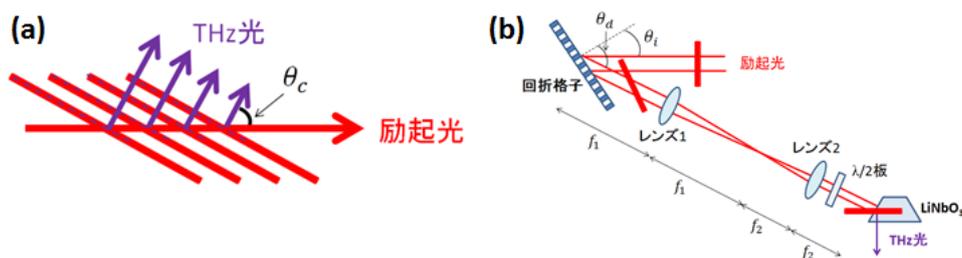


図 1 : (a) 波面傾斜法の概念図。(b) 波面傾斜法の一般的な実験装置図。

さらに高強度の THz 光発生を目指す際、

1. 高い発生効率が期待される波長及びパルス幅の励起光源の選択
2. 高強度励起光照射による結晶の破損や多光子励起を防ぐためのビーム系の大口徑化

が必要となる。前者に対しては、Hebling らによる理論的検討により、波長 $> 1 \mu\text{m}$ 、パルス幅 500 fs ~ 1 ps の励起光の使用が最適である事が示唆されている[5]。筆者らは条件を満たす励起光源として、Yb:YAG 薄ディスクを用いた再生増幅器（波長 1030 nm, パルス幅 1.3 ps、パルスエネルギー 10 mJ、繰り返し周波数 1 kHz）を構築した[6]。

一方、従来の波面傾斜法（図 1 (b)）を大口径励起光に適用した場合、プリズム状の LN 結晶を用いているため、プリズムの頂角付近と頂角から離れた位置では発生するテラヘルツ光の結晶内光学距離や励起光との相互作用長が異なるため、空間的に不均一なビームパターンを持つテラヘルツ光発生が予想される。また本手法では、回折格子により傾斜させた波面を 4f レンズ系で LN 結晶に像転送する必要があり、周辺部での像の歪みによる THz 光発生効率の低下を防ぐための大きな光学系が必要となる。

上記の問題を解決するために Hebling らは一体型回折格子（Contact Grating）法を考案した[7]。本手法では図 2 (a)に示す様に、LN 結晶上に直接回折格子を刻む事によってイメージ転送系を排除し、波面傾斜とテラヘルツ光発生とを同一デバイスで達成させる。本手法では、THz 光の結晶内光路長が増大することなく大口径化が実現され、大強度励起光源を用いた高強度 THz 光発生に適している。また、回折格子と LN 結晶を一体化する事で THz 光発生部が 1 cm 程度のチップ形状におさまり、劇的な装置の小型が実現される。

本デバイスに課される条件は、

1. 式(1)に示された波面傾斜角を実現し位相整合条件を満たす
2. デバイスへの励起光の入射及びデバイスからのテラヘルツ光取り出しの利便性
3. 回折格子による励起光の高い回折効率

の三点が挙げられる。デバイスへの励起光入射角を 44.5° とし、回折格子の格子間隔を 420 nm と設計すれば、式(1)の位相整合条件を満たすと同時にテラヘルツ光の出射方向が入射励起光とほぼ平行になり、実験的に利便性の高いデバイスが実現される。しかし LN 結晶上に直接回折格子を工作した場合、上記の条件で回折効率は高々 20% と計算され、当デバイスでは高効率なテラヘルツ光発生が期待できない事が分かった[8]。

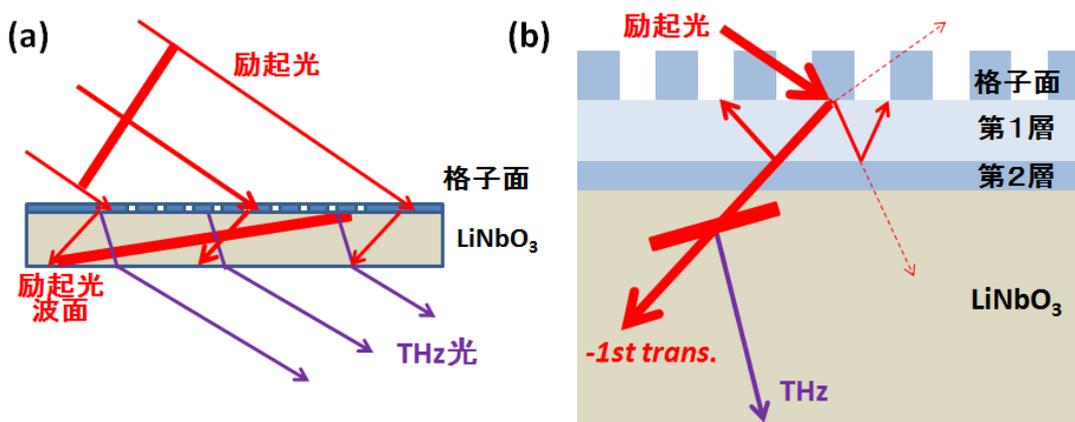


図 2 : (a) Contact grating 法の概念図。(b) Fabry-Perot 型 Contact grating 法の概念図。

我々の研究グループではこの問題を解決するために、図 2 (b)に示す新規形状のデバイスを考案した[9]。本デバイスでは、LN 結晶上に多層膜を蒸着し、その最外膜に回折格子を工作した。第 1 と第 2 薄膜層の界面で回折光に対して全反射条件を満たし、第 1 薄膜層内で回折光に対して共振器を構成するように、薄膜の材質（屈折率）の選択と膜厚の最適化を行った。共振器が Fabry-Perot 条件を満たせば、LN 層への回折光の透過率（回折効率）を増強し、一方でその他の反射・透過成分を減らすことができる。我々

のグループでは現在最大 78%の回折効率が得られるデバイスを開発し、製作及び THz 光発生試験を行っている。

図 3 (a)に製作した本デバイスの断面写真を示す（エッチングマスクを除去する前に撮影）。材質として格子面と第 1 層には Ta_2O_5 （屈折率 2.15）、第 2 層には Al_2O_3 （屈折率 1.64）を用いた。格子層と第 1 層の間に薄い Al_2O_3 層を挿入し、回折格子製作時におけるエッチング過程のストッパーとして作用させ、溝深さの制御を行い製作精度の向上に努めた。膜厚は設計値から 1%以内の誤差、溝幅は 5%程度の誤差で製作された。製作されたデバイスは、図 3 (b)に示す 1 cm 四方程度の小型チップ状デバイスであり、従来の波面傾斜法の光学系と比べて劇的なサイズ縮小が実現されている。図 3 (c)の黒丸点として、製作したデバイスで計測した回折効率の励起光（波長 1030 nm）入射角依存性を示す。入射角 44.5° （位相整合角）で最大の回折効率 78%を得、設計値（図 3 (c)の赤実線）とほぼ同等の回折効率が得られた。

続いて、Yb:YAG 再生増幅器から発生させた励起光を用いた THz 光発生試験を行った。直径 4.5 mm の励起光 5 mJ をデバイスに照射した際、約 $1 \mu J$ の THz 光出力が得られ、効率 2.0×10^{-4} で THz 光が発生していることがわかった。図 4(a)と(b)に、電気光学効果を用いて測定した THz 光波形とそのフーリエ変換スペクトルを示す。モノサイクル THz 光パルスが観測され、中心周波数 0.25 THz、帯域 < 1 THz のスペクトルが得られた。また、図 4(c)に示した THz 光出力の励起光強度依存性から、励起光が 5 mJ 以下の領域では二次的非線形過程である光整流過程が飽和していない事が示された。この様に、Contact grating 法による μJ レベルのテラヘルツ光の発生と、その波形観測は本研究で初めて実現された結果であり、現在更なるデバイスの最適化を行いテラヘルツ光出力の向上に努めている。

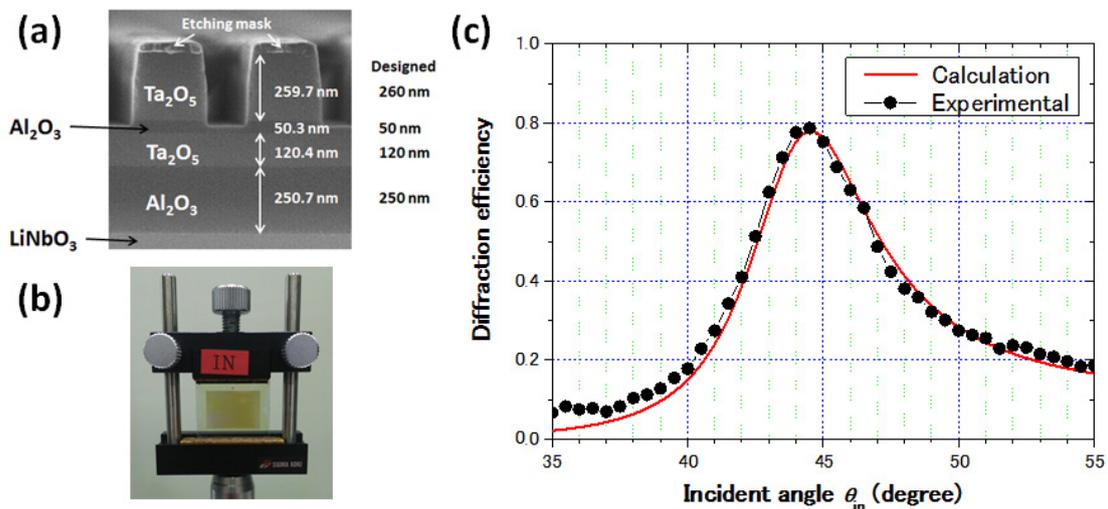


図 3：(a) デバイス断面の透過型電子顕微鏡写真 (NTT アドバンステクノロジー社提供)。(b) デバイスの外観写真。回折格子有効領域 10 mm x 14 mm、厚さ 2.2 mm。(c) 励起光入射角に対する励起光回折効率の計算値（実線）と実測値（黒丸）の比較。

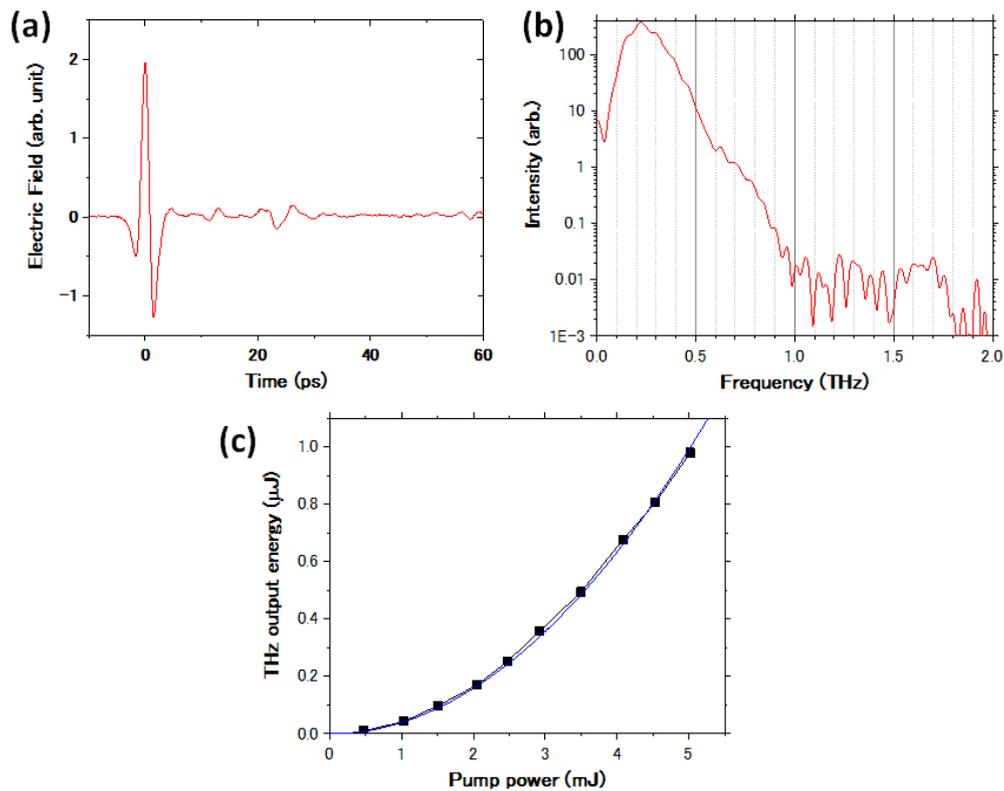


図4：本デバイスで発生させた THz 光の(a)波形、及び(b)スペクトル。(c) THz 光出力の励起光強度依存性。プロットは実験結果、実線は二次関数フィットを示す。励起光入射角 43.2 度に固定して測定を行った。

【参考文献】

- [1] J. Hebling, G. Almási, I. Z. Kozma, and J. Kuhl, *Opt. Express* **10**, 1161 (2002).
- [2] A. G. Stepanov, J. Hebling, and J. Kuhl, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 3000 (2003), A. G. Stepanov, J. Kuhl, I. Z. Kozma, E. Riedle, G. Almási, and J. Hebling, *Opt. Express* **13**, 5762 (2005).
- [3] K. L. Yeh, M. C. Hoffmann, J. Hebling, and K. A. Nelson, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 171121 (2007).
- [4] K.-L. Yeh, J. Hebling, M. C. Hoffmann, and K. A. Nelson, *Opt. Commun.* **281**, 3567 (2008).
- [5] J. A. Fülöp, L. Pálfalvi, G. Almási, and J. Hebling, *Opt. Express* **18**, 12311 (2010), J. A. Fülöp, L. Pálfalvi, M. C. Hoffmann, and J. Hebling, *Opt. Express* **19**, 15090 (2011).
- [6] Y. Ochi, K. Nagashima, M. Maruyama, M. Tsubouchi, F. Yoshida, N. Kohno, M. Mori, and A. Sugiyama, *Opt. Express*, **23**, 15057-15064 (2015).
- [7] L. Pálfalvi, J. A. Fülöp, G. Almási, and J. Hebling, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 171107 (2008).
- [8] K. Nagashima and A. Kosuge, *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, 122504 (2010), **51**, 119201 (2012).
- [9] M. Tsubouchi, K. Nagashima, F. Yoshida, Y. Ochi, and M. Maruyama, *Opt. Lett.* **39**, 5439 (2014), F. Yoshida, K. Nagashima, M. Tsubouchi, Y. Ochi, M. Maruyama, and A. Sugiyama, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 012201 (2016), F. Yoshida, K. Nagashima, M. Tsubouchi, M. Maruyama, and Y. Ochi, *J. Appl. Phys.* **120**, 183103 (2016).