

非線形光学効果を用いた Nd : YAG レーザー励起 広帯域波長可変テラヘルツ波の発生

伊藤 弘昌・川瀬 晃道

広帯域波長可変なテラヘルツ波光源は、自由電子レーザーや気体分子レーザーのように大型なもの、あるいは後進波管や p 型 Ge レーザーのように強磁場を必要とするものなどに限られ、簡便であるとは言い難く、この波長帯は電磁波の暗黒領域とも呼ばれる。近年、数百 fs 以下の超短光パルスを電気光学材料や半導体材料に照射し、超短 THz パルス発生も行われているが、スペクトル的には数 THz の広がりをもつ。筆者らは、Q スイッチ Nd : YAG レーザー励起による、LiNbO₃ 結晶の室温パラメトリック発振により、波長可変な THz 波発生を実現した。その際、結晶内部での THz 波の吸収が大きく、また全反射によりその取出しが容易ではないため、新たに結合方法を考案し、広帯域波長可変性、および高い空間的コヒーレンスを有する THz 波光源を実現した^{1,2)}。本稿では、本 THz 波光源の動作原理や基本構造、および得られた THz 波の特性について述べる。

1. 動作原理

周波数 ω_p の光波から、 $\omega_p = \omega_i + \omega_T$ のエネルギー保存関係を満たす、 ω_T および ω_i ($\omega_T \ll \omega_i$) の THz 波および光波をパラメトリック発振により発生することは原理的には可能である。LiNbO₃ 結晶を用いた場合、最も低いフォノン振動 (A1 対称モード、248 cm⁻¹) と ω_T の電磁波との結合 (すなわちポラリトン) による共鳴ラマン利得が加わり、強いパラメトリック増幅が起こり、掃還によって発振する³⁾。ポラリトンの分散は、パラメトリック相互作用の位相整合条件と等しく、発生する THz 波の波動ベクトルはアイドラー波と 60° 近い角度をなす。

2. 動作実験

装置の基本構成は、Q スイッチ Nd : YAG レーザー (1.064 μm) と、波長可変性を得るために回転ステージ上に固定された LiNbO₃ 結晶 (長さ 50 mm) の光共振器のみからなる (図 1)。ポンプ波は進行波で結晶を励起し、アイドラー波に共振がとられている。代表的な

YAG レーザーの動作条件は、30 mJ/pulse、25 ns のパルスで、繰返しは 16.7 Hz であった。発振は、アイドラー波を観測することにより、容易に確認できる。THz 波帯での LiNbO₃ 結晶の屈折率は約 5.2 と大きく、したがって結晶と空気との境界で全反射し、THz 波を直接外部に取り出すことができない。結晶の角を THz 波の伝搬方向に対して垂直になるように切断、研磨して全反射を防ぐことができるが、取り出される出力はその加工した部分の真下のみの成分に限られる。

図 1 には、この問題を解決する方法として筆者らが考案した、結晶表面にグレーティングを機械加工し、THz 波を結合させている系を示す。ピッチ、深さ、本数は各々 125 μm 、60 μm および 80 本で、全長 10 mm を用いた。出射した THz 波は必要に応じてホワイトポリエチレンのレンズにて集光され、Si-ポロメーター等によって測定した。出力ビーム形状を測定したところ、ほぼガウシアンビームで、その広がりにはグレーティングにそって 0.75°、ビームの幅方向には約 1.0° と回折限界に近い値が得られた。また、放射角 θ は、THz 波長とグレーティングピッチ 125 μm との関係で決まるものと一致した。

図 2 に発生した THz 波の波長可変特性を示す。アイドラー波および THz 波のパルス幅は約 10 ns で、結晶への入射角をわずかに約 1° 回転することにより、THz 波は 150~290 μm 変化しており、これに対応してアイドラー波は 1.072~1.068 μm の変化となる。なお、THz 波の波長、および線幅 (≈ 15 GHz 以下) は、2 枚のメタルメッシュで作製したスキニングファブリーペローエタロンで測定した。また、全長 10 mm のグレーティングカップラーからの THz 波のピーク出力は約 3 mW と見積もられた。

本方式の特徴として、きわめて広い波長可変性が得られることがわかるが、波長同調とともに THz 波の出射方向も変化し、種々の測定において煩わしい。最近筆者らは、Si プリズムカップラーをアイドラー波と平行な結晶端面に配置して THz 波を放射させた場合に、結晶

東北大学電気通信研究所 (〒980-77 仙台市青葉区片平 2-1-1)

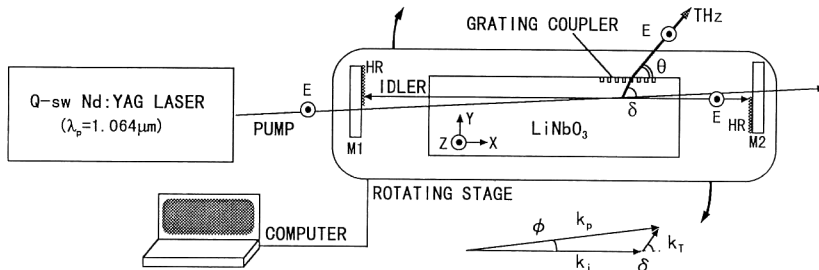


図1 グレーティングカップラーを用いた広帯域波長可変 THz 波発生装置の装置系。

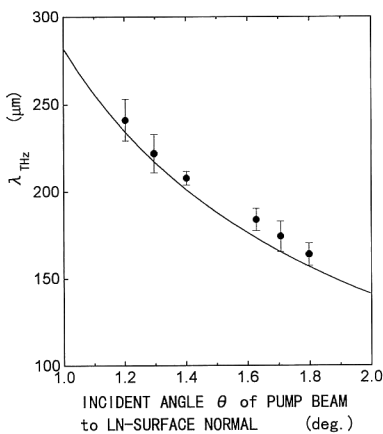


図2 THz 波長のポンプ波入射角依存性。

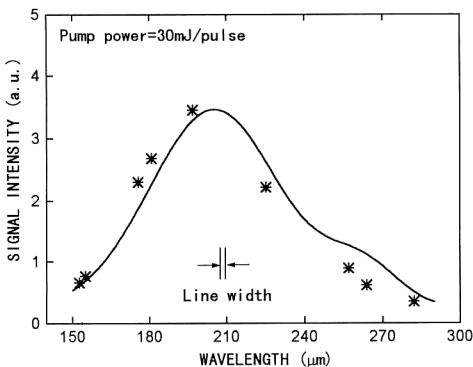


図3 THz 波出力の波長依存性。実線はプリズムカップラー、*印はグレーティングカップラーによる測定。

内部における位相整合角 δ の変化が結晶外部において大幅に軽減され、結晶外でほぼ一定方向の放射が得られることを見いだした⁴⁾。実験系は、図1においてグレーティングの代りにアンドープの Si 単結晶でできたプリズムを設置し、THz 波がプリズム出射面から垂直に放

射されるようにその頂角は 39° にしてある。放射された THz 波ビームはほぼガウシアン形状であった。プリズムから 50 cm 離れた位置にビーム径とほぼ等しい直径 5 mm ϕ のアパーチャーを固定し、THz 波長を全可変範囲 (150~290 μm) で変化させてその出力を検出した結果を図3に示す。この波長-出力特性は、グレーティングカップラーを用いた際に検出器を最適な場所にそれぞれ移動して測定した結果 (図中*印) との差異が少なく、プリズムカップラーによって常に一方 ($\theta = 51^\circ$) に放射されることが確認されるとともに、本方式による THz 波出力の波長依存性をも示している。

3. 今後の展開

ドメインを周期的に制御した擬似位相整合の手法をこの THz 波発生に適用することや、用いる材料として他の強誘電体とともに、THz 波帯で損失の少ない III-V 族半導体等の検討も併せて行っている。THz 波領域の研究の展開は、その光源の性能とともに使用上の容易さが強く求められる。筆者らの現在の装置は、励起光源と発振器を含めて全長 80 cm ときわめて小型であり、さらに小型化が可能である。これまで、光源の制約によって一部の研究者に限られていた THz 波帯研究の門戸が、固体や化学、生物材料の分光、また、プラズマ診断や大気汚染計測、通信、電波天文学等、広範な分野の研究者に開放されていくことも、遠くないと考えている。

文 献

- 1) K. Kawase, M. Sato, T. Taniuchi and H. Ito: Appl. Phys. Lett., **68** (1996) 2483-2485.
- 2) K. Kawase, M. Sato, T. Taniuchi and H. Ito: Int. J. Infrared Millimeter Waves, **17** (1996) 1839-1850.
- 3) M. A. Piestrup, R. N. Fleming and R. H. Pantell: Appl. Phys. Lett., **26** (1975) 418-421.
- 4) K. Kawase and H. Ito: to be published.

(1996年10月1日受理)