

半導体結晶によるテラヘルツ連続波の発生

大学院工学研究科 知能デバイス材料学専攻

弓達 慎太郎 (shintaro.yudate.q7@dc.tohoku.ac.jp)

田邊 匡生 (tadao.tanabe.b1@tohoku.ac.jp)

小山 裕 (oyama@material.tohoku.ac.jp)

1. はじめに

電波は私たちの生活における重要な資源の一つであるが利用できる周波数は限られている。東北大学には、古く八木・宇田アンテナや岡部金次郎教授の陽極分割型マグネトロンそして西澤潤一教授の光ファイバーや半導体レーザー等の光通信要素デバイス等をはじめとする高周波未使用周波数領域を開拓する伝統がある。その結果、マイクロ波からミリ波へと使用可能な高周波領域が開拓されてきたが、一気に光周波数領域に到達してしまい、ミリ波等の電波と光の中間周波数領域が取り残されてきた。電波と光と呼ばれる周波数・波長の境界領域に位置し、周波数としては0.1~10 THz、波長は30 μm ~3 mmの電波が「テラヘルツ帯域」であるが、発生と検出が困難であったために未到電磁波領域と呼ばれてきた。しかし、最近になって高周波半導体デバイスやレーザー機器の発展により、大学や研究機関だけでなく企業においても研究開発が世界中でなされるようになってきた。

小山研究室では材料科学を基盤として、電波の高周波化と光の低周波化のアプローチによるテラヘルツ波光源の開発[1, 2]、発生に必要な半導体結晶の成長とデバイスプロセス技術の開発[3]、さらに開発した光源を非破壊検査などに活用するテラヘルツ応用も展開している[4, 5]。

本稿では特に GaP 結晶を用いるテラヘルツ連続波発生を取り上げ、液体ヘリウムなど極低温を活用することにより得られている結果を中心に紹介する。

2. テラヘルツ波発生

GaP 結晶中における波長が異なる2本の近赤外レーザー光の非線形光学効果のひとつである差周波混合現象に基づき、テラヘルツ帯に存在する横型光学 (TO) フォノンを励起することによりテラヘルツ波が発生する。近赤外レーザー光を GaP 結晶中で平行からわずかにずらし (ノンコリニア位相整合)、2波長の周波数差に相当するテラヘルツ波を発生させることができ、波長を掃引することに

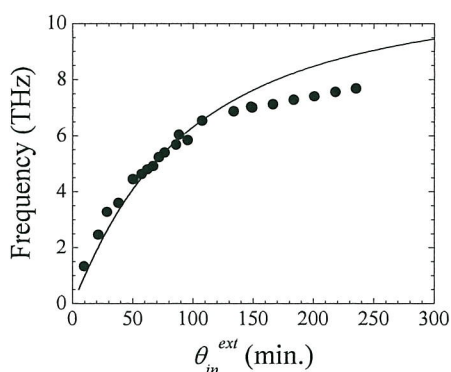


図1. GaPにおけるテラヘルツ発生の位相整合条件。

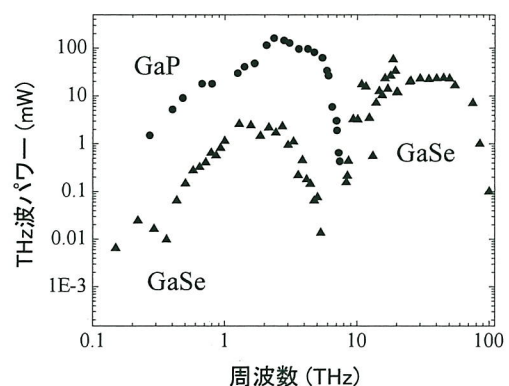


図2. 半導体結晶から発生するテラヘルツ波出力。

より発生周波数が変化する。発生させるテラヘルツ波の周波数と近赤外光の交差する位相整合角度 θ は図 1 に示す関係にあり、GaP 結晶中におけるフォノン-ポラリトンの分散関係に対応する [6]。また、図 2 にはそれぞれの周波数におけるテラヘルツ波の発生強度を示す。光学結晶として GaSe を用いることにより中赤外領域まで幅広く発生できる [1]。

半導体レーザを励起光源とするテラヘルツ連続波発生の光学系を図 3 に示す [7]。半導体レーザには外部共振器型レーザ (ECLD) や分布帰還型レーザ (DFB) を用いる。発生するテラヘルツ波の強度は励起光のエネルギーに比例して増加するため、必要に応じて偏波面保持型イッテルビウム添加ファイバーアンプ (FA) を用いる。

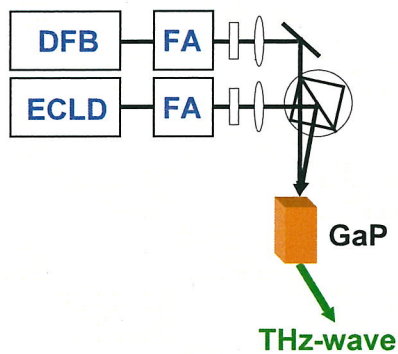


図 3. 連続テラヘルツ波発生の光学系。

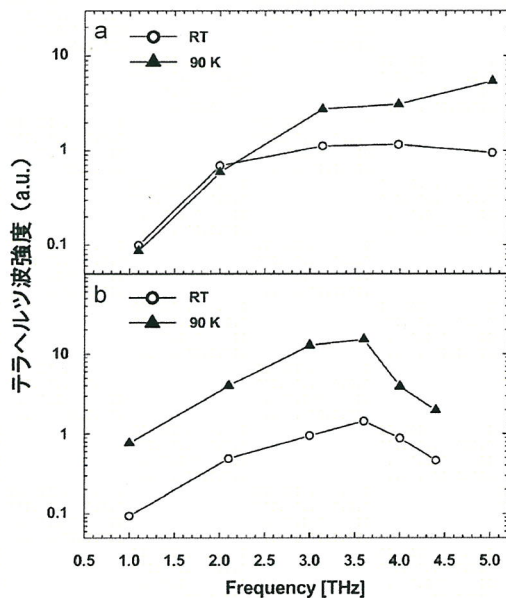


図 4. テラヘルツ波発生強度の GaP 温度変化。

GaP 結晶を冷却することにより TO フォノンの減衰係数 Γ が低下し、テラヘルツ波の吸収が減少するために発生出力を高めることができる [8] (図 4)。キャリア密度が 10^{10} cm^{-3} の半絶縁性 GaP からのテラヘルツ波の発生出力は液体窒素の冷却により、2 THz 以上の周波数において増加し、5 THz における出力は 6 倍まで増加する。キャリア密度が 10^{16} cm^{-3} のノンドープ GaP では液体窒素で冷却することによりいずれの周波数においても出力が大きく増加する。これらの結果から、結晶中における自由キャリアやフォノン吸収によるテラヘルツ波の吸収を抑えることがテラヘルツ波発生の高出力化には重要であり、ストイキオメトリ (化学量論的組成) を制御した結晶成長により半導体結晶中の格子欠陥や転位を抑える必要があることが分かる。蒸気圧制御温度差液相成長法によりストイキオメトリ制御のもとに低温で結晶成長した GaSe 結晶のテラヘルツ帯域における吸収係数は制御しない場合と比較して半分程度まで減少し [3]、高出力のテラヘルツ波発生が実現する。

3. テラヘルツ波検出

テラヘルツ波の検出器としては焦電型検出器やボロメータがある。焦電型検出器としては重水素化硫酸トリグリシン (DTGS) のテラヘルツ波による自発分極の変化を読み取るものがあり、室温で動作するが、ボロメータに比べて感度が低

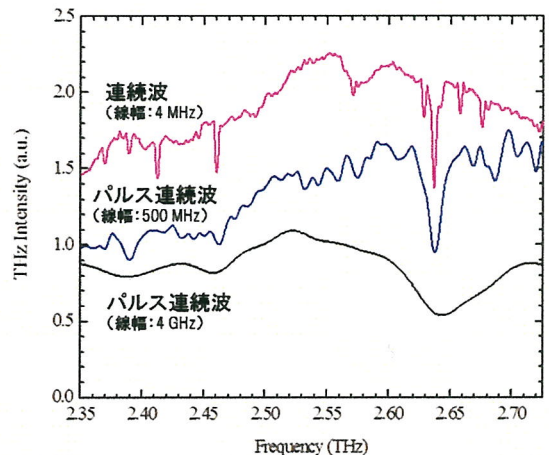


図 5. 各種テラヘルツ波による水蒸気の吸収スペクトル。

温で動作するが、ボロメーターに比べて感度が低いという欠点がある。そのため、パルス状で瞬間的に高強度に発生するテラヘルツ波の検出には使用できるが、テラヘルツ連続波の検出には現状の発生出力 (nW オーダー) では困難である。そのため、テラヘルツ連続波の検出には液体ヘリウム (4.2 K) 冷却によるシリコンボロメータを用いる。

4. テラヘルツ分光応用

テラヘルツ波は室温程度のエネルギーに相当し (300 K、6 THz、約 25 meV、200 cm⁻¹、0.5 Kcal/mol)、物質における弱い結合状態を検出でき、現在までに小山研究室では架橋状態や結晶化度など、物質におけるマクロな形態のテラヘルツ波による検出を実証している。

特にテラヘルツ連続波は小型の半導体レーザーを励起光源とするために、固体レーザーを用いるパルス状のテラヘルツ波と比較して発生光学系がコンパクトであるだけでなく、狭線幅であるため周波数純度が高く、さらに出力自体は小さいが連続波であるために安定性であることから、レーザー分光や通信をはじめとする応用が幅広く期待できる。

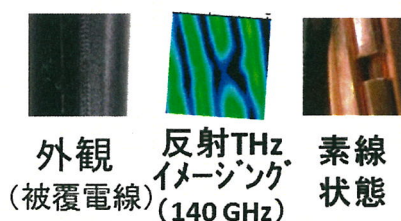


図6. 被覆電線のテラヘルツイメージ像。

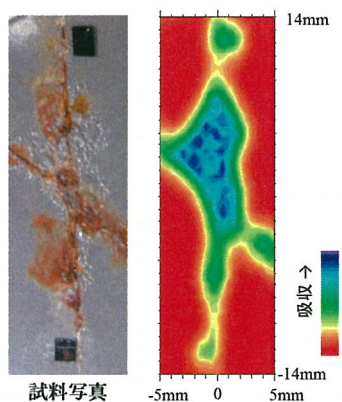


図7. 塗膜下めっき鋼板表面のテラヘルツイメージ像。

発生するテラヘルツ波の周波数純度は励起光の純度に相当し、半導体レーザーの線幅は種類にもよるが2 MHz 程度であり、Q 値としてはおよそ百万と極めて高い。その効果を示すデータとしてテラヘルツ連続波とパルス状のテラヘルツ波による測定した水蒸気の吸収スペクトルを図5に示す[9]。周波数純度が高いテラヘルツ波を用いることにより、吸収ピークの周波数位置と帯域を正確に測定できる。このことは高分子材料の吸収ピークにもとづき評価するガンマ線や紫外線照射による高分子樹脂の構造変化[10]や機械的な内部歪みの非破壊検査[11]にも重要である。

5. テラヘルツキラーアプリケーション

テラヘルツ波を用いるキラーアプリケーションとして、ポリマーやコンクリートなど非極性物質に対する透過性が高く、金属表面における反射強度が腐食などによる表面状態により異なるというテラヘルツ波の特性を利用する非破壊検査技術をコンクリート建築構造物 [4]や被覆金属表面[5]に適用している。その他、導電率や粘度との相関もあり、これらの分布についてはテラヘルツ波の吸収強度や反射率のマッピング測定により評価できる。テラヘルツパルスや高周波発信器のテラヘルツ光源を用いる非破壊検査の具体例を下記に挙げる。

(1) 被覆電線内部における断線や腐食の検査[4]

肉眼では見ることができない絶縁被覆電線中における銅素線のイメージング像を図6に示す。銅線の断線箇所を検出できるほか、銅表面におけるテラヘルツ波の反射率は腐食 (酸化層等の膜厚) の程度により異なるため、腐食状態の評価もできる。

(2) 塗膜下めっき鋼板の腐食状態検査[12]

目視できない塗膜下金属表面の非破壊腐食検査として、エポキシ樹脂が被覆された溶融亜鉛めっき鋼板に対するテラヘルツ分光イメージング測定および微小部蛍光 X 線分析 (μ-XRF) マッピング測定の結果を図7に示す。2.8 THz は ZnCl₂ の吸収ピーク周波数であり、塗膜下における分布状態を知ることができる。

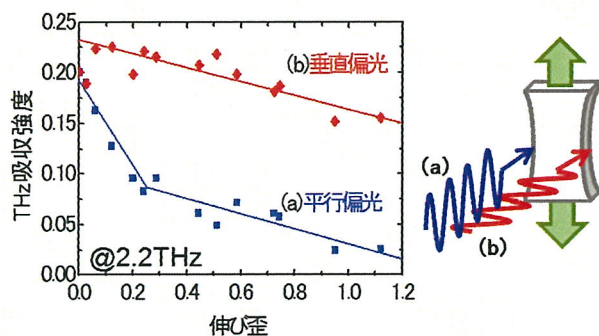


図 8. 一軸引張変形ポリエチレンのテラヘルツ吸収強度。

(3) 高分子材料における機械歪みの検出[11]

ポリエチレン分子鎖間の面内並進振動 (2.2 THz) による吸収バンドについて、一軸引張変形にともなう強度変化をテラヘルツ波により偏光分光測定した (図 8)。それらの結果は X 線回折によるポリエチレン結晶の配向状態測定結果と極めて良く一致する。

6. まとめ

液体ヘリウムなどの極低温を活用して、半導体結晶を用いるテラヘルツ技術の研究開発を展開している。テラヘルツ波の検出をはじめ、発生出力を高めるための材料設計、熱ノイズを低減させた状態における分子振動の精密計測など幅広く冷媒を活用している。

参考文献

- [1] T. Tanabe, Y. Oyama in "Laser Systems for Applications" edited by Krzysztof Jakubczak (InTech, 2011) 119
- [2] S. Balasekaran, K. Endo, T. Tanabe, Y. Oyama, Solid-State Electron. **54** (2010) 1578.
- [3] Y. Nagai, K. Maeda, K. Suzuki, Y. Oyama J. Electron. Mater. **43** (2014) 3117.
- [4] Y. Oyama, L. Zhen, T. Tanabe, M. Kagaya, NDT & E Int. **42** (2009) 28.
- [5] S. Takahashi, T. Hamano, K. Nakajima, T. Tanabe, Y. Oyama, NDT & E Int. **61** (2014) 75.
- [6] T. Tanabe, K. Suto, J. Nishizawa, T. Kimura, K. Saito, J. Appl. Phys. **93** (2003) 4610.

- [7] J. Nishizawa, T. Tanabe, K. Suto, Y. Watanabe, T. Sasaki, Y. Oyama, IEEE Photo. Tech. Lett. **18** (2006) 2008.
- [8] K. Saito, T. Tanabe, Y. Oyama, K. Suto, T. Kimura, J. Nishizawa, J. Phys. Chem. Solids **69** (2008) 597.
- [9] T. Tanabe, S. Ragam, Y. Oyama, Review Sci. Instrum. **80** (2009) 113105.
- [10] J. Nishizawa, T. Sasaki, K. Suto, M. Ito, T. Yoshida, T. Tanabe, Int. J. Infrared Millimeter Waves **29** (2008) 291.
- [11] T. Tanabe, K. Watanabe, Y. Oyama, K. Seo, NDT & E Int. **43** (2010) 329.
- [12] 中村悠太 假屋英孝 佐藤明宏 田邊匡生 西原克浩 谷山明 中嶋かおり 前田健作 小山裕, 材料と環境 **63** (2014) 504.