

物質の五感を操り，機能を紡ぐ

Keyword: テラヘルツ波

1. テラヘルツ波とは

1888年のヘルツ(H. R. Hertz)の実験を端緒として，人類は電波から光波へと周波数資源の拡大を遂げてきた。¹⁾ テラヘルツ波は，電波と光波の中間に位置する波長約 $10\ \mu\text{m}$ (周波数 30 THz) ないし $1\ \text{mm}$ (周波数 300 GHz) の電磁波であり，人体に安全で，物質を構成する分子の振動周波数と重なり，ほぼすべての物質の指紋スペクトルが存在するなど，他の電磁波にはないユニークな特徴を有している(図1)。近年，レーザフォトンクスやエレクトロニクスによるデバイス技術の急速な発展に支えられ，分光・分析・イメージング，さらには超高速無線通信といったさまざまな学術や産業応用の分野でテラヘルツ波を利用する技術が急速に進展している。¹⁻⁵⁾

2. テラヘルツ波と物質との相互作用

テラヘルツ波の発生は，物質と光子との相互作用を応用して実現できる。レーザ発振は，電子軌道間の遷移に伴う発光が源となる。しかし，テラヘルツ光子のエネルギーは meV オーダーと微弱であり，電子軌道間の遷移を直接利用することができない。そこで，分子の振動モード(吸収線)間の遷移や，超格子構造による量子閉じ込めによって分裂したサブバンド間の遷移を利用してテラヘルツレーザが実現されている。グラフェン(炭素原子の六員環単層二次元シート)のようにギャップレスかつ対称分散なバンド間の遷移もテラヘルツ光子の発光に応用できる。

それら以外にも，結晶の格子振動(フォノン)，分子の回転振動や巨大分子の振動モード，電子電荷の集団振動(プラズモン)，超伝導状態における Bose 凝縮に伴う超伝導ギャップ，半導体中の励起子の束縛エネルギー，スピン軌道相互作用によるスピン分極など，テラヘルツ領域には

さまざまな物質の励起モードが存在する。これらの励起モードと光子との相互作用によって，テラヘルツ波の発光や検出が可能であると同時に，そこに介在する物性を同定することができる。電氣的・磁氣的・光学的・機械的・熱力学的性質を“五感”とすれば，「テラヘルツ波は“物質の五感を操る”光」とも言えよう。

a) フォノンとの相互作用(フォノンポラリトン)

赤外線レーザを非線形光学結晶に照射すると，結晶内にコヒーレントな光学フォノンを励起できる。その際，エネルギー保存則によって，物質と相互作用した後に射出される光子(アイドラー光)のエネルギーはフォノンエネルギーだけ低下する。重要なのは，誘導ラマン散乱を経て，コヒーレントフォノンと結合したテラヘルツ帯の光子(フォノンポラリトン)が，生成されることである(図2)。結晶の方位と入射光の入射角により，位相整合条件を満たすテラヘルツ光子エネルギーを一意に定めることができるため，単色テラヘルツ光子を発生できる。この原理に基づくテラヘルツパラメトリック光源が実用化されている。最近，理研・南出泰重博士らによって，自由電子レーザに迫るピークパワー 10 kW 超，パルスエネルギー 10 μJ 超の超高強度テラヘルツ光源が実現されている。⁴⁾ パラメトリック逆過程を利用することによって，極めて微弱なテラヘルツ光を検出できることも報告されている。⁴⁾

b) エレクトロンとの相互作用

上記の高强度テラヘルツパルスが作る電場強度は 1 MV/cm 以上にも達し，固体の絶縁破壊電界や半導体デバイス内部の電界強度上限をも上回る。しかも，励起用レーザのパルス幅で決まるサブナノ秒～フェムト秒の極めて短時間での繰り返し発光が可能のため，物質内部の電子状態を速度飽和に至る極限まで瞬時に励起し，結晶格子が温度

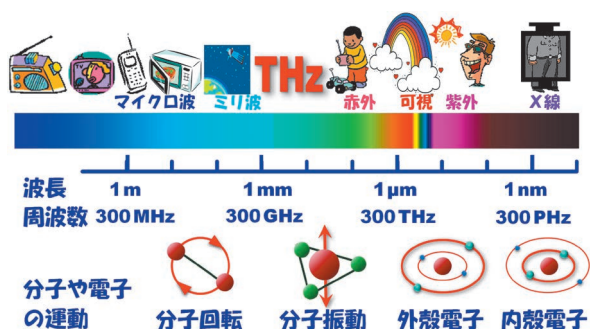


図1 テラヘルツ (THz) 波。

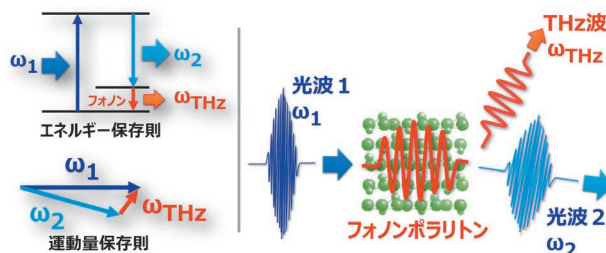


図2 テラヘルツ波のパラメトリック発生。

上昇する前にホットキャリアの緩和応答を高い時間分解能で観測することができる。

最近の話題として、グラフェンにおける超高速キャリアエネルギー緩和過程の物性解明とそのテラヘルツデバイス応用が上げられる。赤外線レーザーで励起したグラフェン内キャリアの非平衡ダイナミクスの観測において、キャリアの衝突イオン化によるテラヘルツフォトンの多重生成や、キャリア反転分布に伴うテラヘルツフォトンの誘導放出が活発に研究されており、新たなテラヘルツ波増幅器やレーザー光源の開拓が期待されている。⁵⁾

c) プラズモンとの相互作用 (プラズモンポラリトン)

テラヘルツフォトンによって結晶表面や量子井戸内に二次元的に局在する電子電荷の集団振動量子：プラズモンを励起することができる。いわゆる表面プラズモンポラリトン (SPP) の励起である。SPPの群速度はキャリア濃度に依存し、光速に比して2桁も低く、‘遅波’としての性質を有する。それに応じてテラヘルツプラズモンの波長は100 nmのオーダーであり、テラヘルツフォトンの波長より2桁短い。この空間閉じ込めと波長短縮効果により、SPPは半導体ナノデバイスのテラヘルツ波導波路として有効である。また、SPPの‘遅波’の性質は、フォトンと物質との相互作用を桁違いに増強する。たとえば、回折限界よりも小さなピンホールしか空いていない金属板に入射した光波が、ピンホールを通して100%透過できる (SPPによる異常透過現象)。

半導体の光学導電率 (フォトンの吸収・放出が介在する光周波数領域における導電率) は、キャリアのバンド内輸送に由来した自由キャリアの光学吸収に伴う成分 σ^{intra} とバンド間遷移 (生成・消滅) に由来した成分 σ^{inter} の和によって与えられる。今ホットなグラフェンを例として、光学導電率を図3に示す。 σ^{intra} は、Drude理論に基づき、周波数

とともに単調減少し、常に正值を取る。つまり、損失・吸収を与える。一方、 σ^{inter} は、ポンピング (光学励起) によってキャリアは反転分布となり、その結果、負値を取り得る。このとき、 $|\sigma^{\text{inter}}|$ が $|\sigma^{\text{intra}}|$ を上回れば、正味の利得・増幅作用が得られる。ギャップレスかつ線形対称分散なバンド構造を有するグラフェンは、テラヘルツ帯で負性導電率 (利得) を得ることができる。

グラフェンにおけるSPPの作用を図3に追記する。ドーピング性のグラフェンにおいては、Drude理論に基づく光学吸収率の上限を超えてテラヘルツ波を吸収できる。SPPは非線形性が強く、テラヘルツ波の吸収によって光整流効果が生じるために、テラヘルツ波の高感度検出に応用できる。一方、ポンピングしたグラフェンにおいては、SPPのモード周波数を負性導電率の周波数帯に設定することによって、バンド間遷移に基づく σ^{inter} に比して、2桁以上の巨大利得増強作用が得られる。^{3,5)}

3. 今後の展望

テラヘルツ分光技術の誕生に端を発した一世紀に亘る歴史を経て、テラヘルツ波の研究は単なる物性研究から、物質創製、デバイス応用、イメージングシステムへと深化した。グラフェン、シリセン、遷移金属ダイカルコゲナイド等の二次元原子薄膜とそれらのヘテロ接合材料や、トポロジカル絶縁体、強磁性金属・絶縁体・半導体によるスピントロニクスなど、新材料・新物性の探索とそれらのテラヘルツ波応用研究で、今後も多くのブレイクスルーが期待される。

産業応用の観点からは、テラヘルツ波の物質同定能力は非破壊・非接触検査技術として安心・安全・セキュリティ・農業・医薬等の幅広い分野への実用化が進展している。さらには、テラヘルツ帯で室温動作する集積型デバイスの一層の進化によって、超高速テラヘルツ無線に代表される未来情報通信技術の研究が本格化している。テラヘルツ波科学技術の進化は速く、今後の展開に目が離せない。

参考文献

- 1) P. H. Siegel: IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **50** (2002) 910.
- 2) M. Tonouchi: Nature Photon. **1** (2007) 97.
- 3) H.-J. Song and T. Nagatsuma, eds.: *Handbook of Terahertz Technologies: Devices and Applications* (Pan Stanford Pub., 2015).
- 4) H. Ito: IEEE Photon. J. **6** (2014) 0701405.
- 5) R. R. Hartmann, et al.: Nanotechnol. **25** (2014) 322001.

尾辻泰一 (東北大学電気通信研究所 otsuji@riec.tohoku.ac.jp)

(2015年5月4日原稿受付)

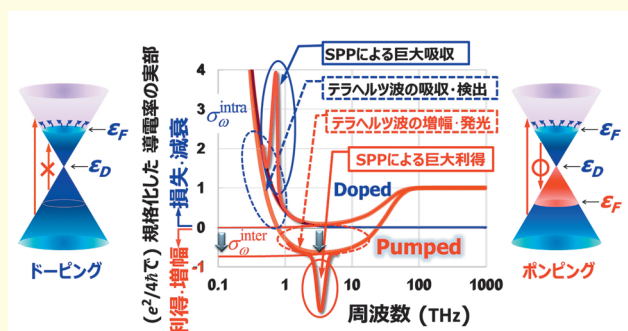


図3 グラフェンのテラヘルツ帯導電率とSPPによる増強効果。