

高感度テラヘルツ光学活性計測技術の開発

島野 亮

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

1. 研究のねらい

光と電波の中間周波数に位置するテラヘルツ (THz) 周波数帯では、半導体の自由キャリア応答や誘電体のフォノン、生体分子の分子振動等、多くの物質系で固有の吸収が観測される。近年、超短光パルス (フェムト秒) レーザーの進歩、普及とともに、未開拓であったこの周波数帯の計測技術が大きな進歩を遂げつつあり、様々な物質の計測分析手法として急速に発展しつつある。本研究は、この THz 波の「偏光」に着目し、時間空間コヒーレンスの優れた THz パルスの特徴を活かして、高感度の THz エリプソメトリーを開発し、光学活性計測、磁気光学効果測定へと応用することを目的とした。

2. 研究成果

2-1) テラヘルツ帯の円偏光変調器の開発

可視光あるいは中赤外領域の偏光分光測定では、偏光子、波長板、偏光変調器等の光学素子が使用される。THz 周波数帯では、偏光子としては一般にワイヤグリッド偏光子が用いられるが、簡便な波長板や偏光変調素子が欠如している。そこで、本研究では、円偏光 THz 波発生器を開発した。THz 波パルス をフェムト秒光パルス対で発生させ、光パルス対の時間間隔と偏光を制御することにより、0.3~2.5 THz (1.2~10 meV、10~83 cm⁻¹) の範囲で楕円率を自由に制御できる円偏光 THz 波発生器を開発した (図 1)。

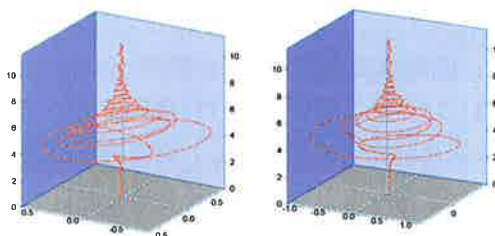


図 1 フェムト秒光パルス対による生成された円偏光 THz 波の電場成分の軌跡 (光パルス対の時間間隔を変えることで円偏光を制御できる)

2-2) 高ダイナミックレンジを有するテラヘルツ分光系の開発

高感度偏光計測のために、THz 波検出のダイナミックレンジの向上を行った。THz 波発生には p 型 InAs 表面からの高強度 THz 波発生を用い、THz 波検出には量子雑音 (ショットノイズ) レベルで動作する差動光検出器による E0 サンプリング法を用いて、電場振幅にして 5 桁、強度で 11 桁弱 (図 2) に及ぶ高いダイナミックレンジを有する簡便な THz 分光法を確立した。

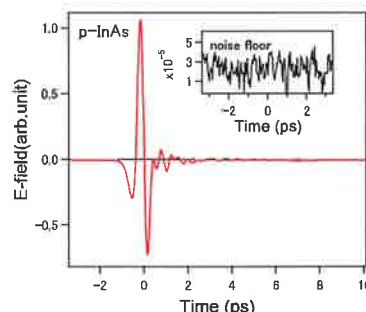


図 2 THz 波の電場時間波形

2-3) THz ホール効果測定による半導体の非接触キャリア濃度、移動度評価

THz 帯で 1 ミリラジアン以下の偏光回転検出感度を達成し (図 3)、磁気光学ファラデー効果のスペクトル計測から半導体のキャリア濃度を高感度、非接触で評価する手法を開発した。同手法を厚さ 525 μm の n 型 Si 基板に適用し、10¹³ cm⁻³ の低キャリア濃度領域で、キャリア濃度、移動度を定量的に評価できることを実証した。本手法により、従来のテラヘルツ分光法では困難であったキャリア濃度領域での非接触評価が可能となり、対象物質の範囲が格段に広がった。

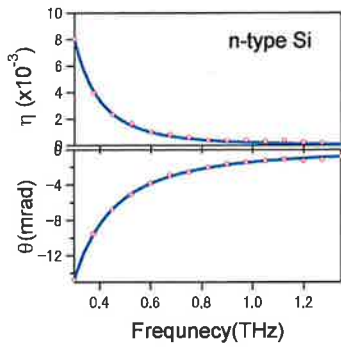


図3 n型Si基板のファラデー回転角 θ と楕円率 η
(印加磁場は0.05T、実線はドルーデモデルによる理論曲線。フィッティングからキャリア濃度 $6 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 、移動度 $1.7 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{Vs}$ と求まる)

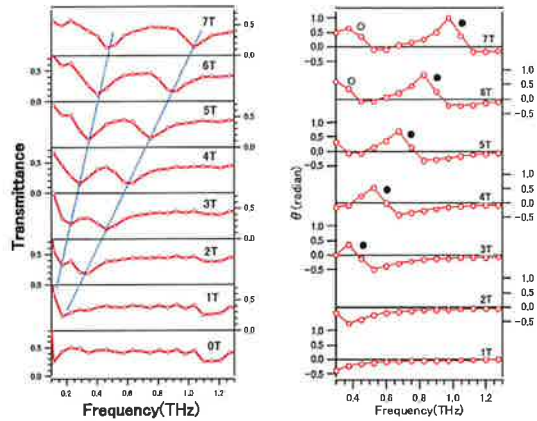


図4 n型Siにおけるサイクロトロン吸収スペクトル(左)とファラデー回転角スペクトル(右)の磁場依存性
(二つの有効質量に対応する共鳴吸収が観測される。ファラデー回転角は共鳴前後で分散型のスペクトルを示す)

2-4) 低温強磁場環境下でのテラヘルツ分光システムの開発

低温($\geq 1.6\text{K}$)、強磁場($\leq 7\text{T}$)環境下でのTHz分光システムの開発を行った。さらに、このシステムに偏光計測手法を導入し、低温強磁場環境下での光学活性計測を実現することができた。同システムを用いて半導体のサイクロトロン共鳴スペクトルの観測を行った(図4)。また、偏光計測から、サイクロトロン共鳴周波数領域でのファラデー回転スペクトルと楕円率(円二色性)スペクトルの観測、交流ホール伝導度スペクトルの評価が可能になった。また、同手法を用いて超伝導体磁束量子系の電荷ダイナミクスを調べることが可能になった。

3. 主な発表

論文

- R. Shimano, H. Nishimura, and T. Sato,
Frequency Tunable Circular Polarization Control of Terahertz Radiation,
Japanese Journal of Applied Physics 2, vol.44, L676-L678 (2005).
- Y. Ikebe and R. Shimano
High sensitive terahertz Faraday rotation measurements of doped semiconductors,
Proceedings of Quantum Electronics and Laser Science Conference 2007

招待講演

- Ryo Shimano, *Terahertz Hall measurements by magneto optical spectroscopy,*
The 3rd COE workshop "Frontiers of Laser and Optical Sciences"
October 2005, the University of Tokyo
- Ryo Shimano, *Terahertz spectroscopy of multiferroics and superconductors,*
2007CERC International Symposium, May 2007, Akihabara
- 島野 亮: テラヘルツエリプソメトリーの開発,
第5回応用物理学関係連合講演会シンポジウム「テラヘルツ波による化学・バイオ・電子材料評価の最前線」2005年3月29日