

1.1 島野研究室

島野研究室では、レーザー分光の手法を用いて、凝縮系を中心とする光と物質の相互作用の解明、光励起によって発現する多体の量子現象の探索に取り組んでいる。特に、多体の電子相関によって生じる量子物性、秩序変化をプローブする新しい手法として、テラヘルツ電磁波による分光に注目し、分光手法の開拓を進めている。

本研究室は、2004年3月に島野が着任して発足した。本年度は、立ち上げに際して、実験室環境の整備とレーザー設備の構築に注力した。超短パルスレーザー設備の導入、立ち上げを完了し、ようやくテラヘルツ周波数帯の線形分光システムの構築にこぎつけた。8月には渡邊紳一助手が着任し、また2005年度より大学院生を迎え、本格的に研究を開始する段階となった。今後、低次元電子系を中心として、その光応答、光励起ダイナミクスの解明に取り組む。

1.1.1 テラヘルツ分光法の開拓

テラヘルツ周波数帯の誘電関数、電気伝導度スペクトルを高感度かつ高精度に計測するために以下の手法の開拓を進めた。

高速掃引テラヘルツ時間領域分光法の開拓

本年度は、まずテラヘルツ (THz) 分光系の基盤となるフェムト秒レーザーシステムの整備を行った。パルス幅 100 フェムト秒のモード同期チタンサファイアレーザーの立ち上げを行い、これを用いて THz 電磁波の発生、検出系の構築を進めた。THz 発生には、二次的非線形光学過程である光整流効果を利用し、検出には電気光学 (EO) サンプリング法を用いた。非線形光学結晶には II-VI 族半導体 ZnTe を使用し、0.5THz-2.5THz (光子エネルギー 2meV-10meV) の範囲での分光測定が可能となった。複素透過率の実測値から、複素誘電関数、あるいは複素電気伝導度スペクトルを導出する数値計算アルゴリズムを構築した。THz 時間領域分光法では、1ピコ秒程度で振動する電場の時間波形を、EO サンプリングの手法により直接時間軸上で計測する。光サンプリング用のゲート光パルスを高速で掃引する計測アルゴリズム (ラピッドスキャン法) を開発し、THz 時間波形を約 0.2 秒で計測することが可能となった。THz 時間波形をオシロスコープ上でリアルタイムで観測することができる。このラピッドスキャン法により、データ取得効率、S/N 比を大幅に改善することが可能となった。

非接触ホール効果計測

磁場中あるいは磁化を持つ物質に直線偏光の光を入射すると、その反射波や透過波の偏光面は回転する (磁気光学カー効果、ファラデー効果)。これら磁気光学効果は、光学的にホール伝導度を決定する手段として光領域では有用に利用されている。さて、

ホール伝導度は外部磁場あるいは自発磁化のもとでの、キャリアの電気伝導特性を特徴づける。通常の直流ホール効果の測定ではその起源となるキャリアの動的散乱過程は平均化されてしまう。交流、すなわちダイナミックなホール効果の測定はキャリアの微視的な散乱過程を顕在化してくれると期待されるが、光領域での測定では、バンド間遷移などの寄与が加わる為、直流測定の結果とはつながらないことも多い。そこで電気伝導度評価の高周波極限として THz 周波数帯におけるホール測定に注目し、THz 周波数帯における偏光分光法、磁気光学分光法を開拓を進めている。テラヘルツ時間領域分光法の特徴のひとつは、電場の振幅と位相の同時計測を行う点にある。島野らは先行研究によって、この特徴を利用すると、強度測定では得られない高感度の偏光回転計測が可能であることを見出した。そこで、テラヘルツ非接触ホール測定を有意な物性計測手法として確立するべく、高感度偏光回転計測法を開拓を進めている。

本年度は、高感度化を実現する一つの手法として円偏光変調法を検討した。テラヘルツパルスの偏光変調系を試作し、原理検証実験を行った。偏光の異なる二つの THz パルスを発生させ両者の相対位相制御を行うことで、合成テラヘルツ波の偏光変調が可能であることを実証した。結果を図に示す。位相差を変化させることで、任意の波長に対する円偏光発生器として動作することを確認した。左右円偏光に対する媒質の屈折率の差、吸収係数の差からホール伝導度を決定することが可能となる。さらには、磁場/非磁場下での電子の軌道回転運動あるいは分子の回転振動を共鳴的に励起することも可能であり、そのエネルギー散逸のダイナミクスを調べることができると期待される。

1.1.2 低次元電子系のテラヘルツ分光

カーボンナノチューブ

カーボンナノチューブは、理想的な 1 次元電子系として多くの関心を集めている。半導体ナノチューブでは、1次元性を反映して van Hove 特異点における状態密度の発散や、励起子束縛エネルギーの増大が予想され、ごく最近その実験的検証もなされるようになってきた。一方金属ナノチューブでは、後方散乱の消失、バリスティック伝導など特異な振舞いが示され、光電子分光の測定からは朝永ラッティンジャー流体的な性質を示す結果も報告されている。我々は、このナノチューブの 1 次元的な伝導を分光的手法により明らかにすべく、そのテラヘルツ分光に着手した。電極フリーの非接触伝導計測としてのテラヘルツ分光の利点を活かし、まずナノチューブの線形伝導度スペクトルの計測を開始した。今後、線形応答で得られる知見に基づいて、ナノチューブの光励起状態、光伝導ダイナミクスの計測へと研究を展開する。

< 報文 >

(原著論文)

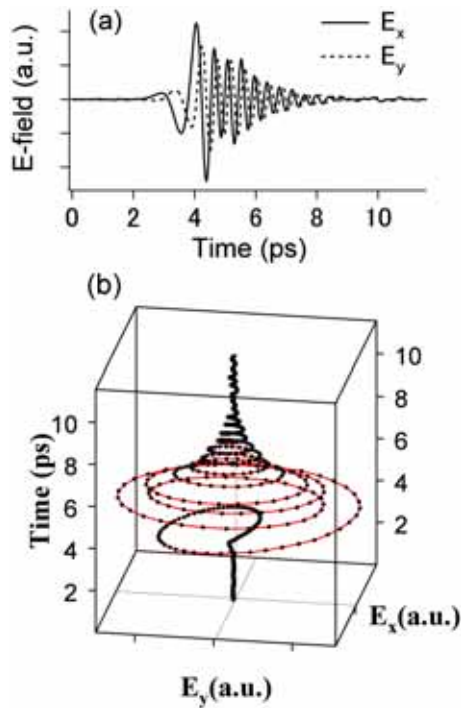


図 1.1.1: (a) 円偏光テラヘルツ波の時間波形、直交する二方位間に約 $1/4$ 波長の位相差がついている。(b) 電場の軌跡。

- [1] R. Shimano, H. Nishimura, and T. Sato, "Frequency Tunable Circular Polarization Control of Terahertz Radiation", Japanese Journal of Applied Physics, Part 2, in press.

< 学術講演 >

(国内会議)

一般講演

- [2] 島野 亮、井野雄介、五神 真：テラヘルツ偏光分光法によるサブミラジアン磁気光学信号検出，日本物理学会 2004 年秋季大会 於 青森大学（2004 年 9 月 13 日）

招待講演

- [3] 島野 亮：テラヘルツエリプソメトリーの開発，第 52 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」於 埼玉大学（2005 年 3 月 29 日）

(セミナー)

- [4] 島野 亮：半導体の高密度光励起現象，東京大学理学部物理学教室 教室談話会，2004 年 6 月 25 日

1 Shimano Group

Research Subjects: Optical and Terahertz Spectroscopy of Condensed Matter

Member: Ryo Shimano and Shinichi Watanabe

Our research interests are light-matter interactions and many body quantum correlations in optically excited semiconductors and low dimensional systems such as carbon nanotubes, organic conductors. Our study focuses on the low energy electromagnetic responses in the region of several meV, i.e., terahertz frequency region where various collective excitations exist. We also aim at studying the ultrafast dynamics of photo-induced phase transition in those low dimensional systems by THz conductivity measurements. R. Shimano started working at Physics Department, University of Tokyo in March, 2004. S. Watanabe joined our group in August, 2004.

The research summary in this year is as follows.

1. Development of novel terahertz spectroscopic technique

Rapidscan terahertz time domain spectroscopy

Firstly, we have constructed a conventional terahertz time-domain spectroscopy setup. Optical rectification and electro-optic detection scheme is used for the THz generation and detection, respectively. Determination of dielectric function in the frequency range between 0.5 to 2.5THz has become possible. Secondly, we introduced a rapid scan system, by shaking the optical gate pulse of electro-optic sampling. As a result, the data taking period is drastically reduced, typically within 0.2sec for 20psec scan range, and the real time indication of THz waveform become possible. The scheme allows us to eliminate the effect of long term fluctuation of laser light.

Terahertz Hall measurements

Magneto-optical effect such as Faraday effect or magneto-optical Kerr effect enables us to investigate the ultrafast spin dynamics and transport properties under magnetic field, by optical means, i.e., without using electrodes. Recently, it has become possible to perform the magneto-optical measurements in THz frequency region. Because the phenomenon is equivalent to the high frequency ac Hall effect, the magneto-optical effect provides us deep insights into the dynamical properties of scattering processes of electrons under magnetic field. However, the magneto-optical signal, i.e., the polarization rotation and ellipticity of transmitted or reflected light is typically very small, of the order of mrad or less in the THz frequency regime. Accordingly, it is particularly important to develop a high sensitive detection scheme of polarization rotation and ellipticity. For this purpose, we have developed a scheme to control and modulate the circular polarization of a broadband THz pulse, which can be applied to high sensitive detection of circular dichroism in the THz region. The technique is based on the relative phase control of two THz pulses that are generated from optical rectification of ultrashort optical pulses in a ZnTe crystal. By changing the temporal separation of the optical pump pulses, continuous control of circular polarization from right to left is achieved in the frequency range from 0.3 to 2.5THz.

2. Terahertz spectroscopy of carbon nanotubes

Carbon nanotubes are considered as one of the candidate materials for one dimensional electron system. Various exotic behaviors in optical and transport phenomena have been observed, while the dynamical aspects of transport properties are open problems. In order to clarify this issue, and to reveal the one dimensional nature of nanotubes, we started the study of THz electromagnetic responses of nanotubes.