

平成17年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

ふりがな（ローマ字）		HANGYO MASANORI					
①研究代表者 氏名		萩行 正憲		②所属研究機関・ 部局・職			
				大阪大学・レーザーエネルギー学研 究センター・教授			
③研究 課題 名	和文	レーザー励起テラヘルツ波の高度応用					
	英文	Advanced Application of Laser-Excited Terahertz Waves					
④研究経費		平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	総合計
17年度以降は内約額 金額単位：千円		18,200	19,900	17,400	7,600	7,300	70,400
⑤研究組織（研究代表者及び研究分担者）							
氏名		所属研究機関・部局・職		現在の専門		役割分担（研究実施計画に対する分担事項）	
萩行 正憲		大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授		テラヘルツ波工学、光物性		研究の総括、テラヘルツ光源の開発、磁気光学効果の測定 磁気光学効果測定システムの構築 CW マルチモードレーザーダイオードを用いたシステムの構築	
長島 健		大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・助手		テラヘルツ波工学、固体物性			
森川 治		海上保安大学校・自然科学講座・助教授		テラヘルツ波工学			
⑥当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）							
<p>テラヘルツ波は、従来は未開拓電磁波と呼ばれ、基礎研究が着実に進められていたものの応用とは程遠いものであった。しかしながら、1980年代に超短パルスレーザーを半導体光伝導スイッチや半導体表面に照射してテラヘルツ波を放射する技術が現れ、最近のレーザー技術の発展に伴いテラヘルツ波技術は飛躍的な進歩を遂げつつある。本研究の目的は、申請者らが開発してきた新しいテラヘルツ分光やイメージングの手法を、高度な物性測定や新しい材料、バイオ関連試料の測定に応用し、広範な応用への基礎を築くことにある。大まかなテーマ分けとしては、1.コンパクトサブミリワット、60THz テラヘルツ光源の開発、2.強磁場下でのテラヘルツ磁気光学効果測定システムの開発と物性測定への応用、3.テラヘルツ・フォトニック結晶の開発とテラヘルツ特性の測定、4.生体関連物質の低振動スペクトルの測定、5.汎用 CW 半導体レーザーを用いた超小型普及型テラヘルツ分光・イメージングシステムの開発、である。</p>							

⑦これまでの研究経過 (研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。)

1. テラヘルツ光源の開発

InAs 表面からのテラヘルツ波放射について、MgO 半球レンズを表面に装着し、レンズ側からレーザーパルスによる励起を行った。反射配置でテラヘルツ波を取り出す場合の放射について詳しく測定を行い、最適な配置を決定し、また、理論計算との比較を行なった。その結果、レンズを装着しない場合に比べて約 50 倍の強度増強が確認され、理論と良い一致が得られた(Appl. Phys. Lett. **85** (2004) 191)。

ウェッジ型 ZnTe 結晶による光整流効果により、60THz 付近までの超広帯域をある程度周波数領域を制御しつつ放射することに成功し、S/N 比は十分ではないものの 30THz 付近までは分光用光源として使用できることを示した。

2. 磁気光学効果測定システムの構築と物性測定への応用

最大 10 テスラの超伝導マグネットを用いたテラヘルツ磁気光学効果測定システムを構築した。図 1 は透過型のシステムで、この装置によりファラデー効果による試料透過後のテラヘルツ波の楕円率と偏光回転スペクトルを測定することができる。図 2 はその結果で、試料はn型のInAs及びGaAsでドーパ量は 10^{16} cm^{-3} のオーダーである。楕円率と偏光回転角は、磁場とともに系統的に変化しているが、その周波数依存性は 6T以下の低磁場では単純なドルーデモデル(実線)からずれる。従来、この図で示されるような高精度での磁気光学効果の測定はなされておらず、本結果は離散ランダウ準位の効果も含めて、厳密な理論的解析が必要と考えられる。現在、クライオスタットを装着した低温測定システムを構築中である。



図 1 ヘリウムレス超伝導マグネットを用いたテラヘルツ磁気光学効果測定システム

3. フォトニック結晶への応用

2次元誘電体球配列フォトニック結晶(2D-DPC)と2次元金属開孔配列フォトニック結晶(2D-MPC)について測定を行なった。前者については、以前、テラヘルツ帯において従来にない実験と理論の一致が得られることを示したが、さらに、屈折率が高い材料(Si_3N_4 , $n \sim 2.99$)と低い材料(テフロン, $n \sim 1.44$)で試料を作製した場合に、前者では球内に閉じ込められたwhispering gallery modeから出発する描像が、後者では平板内の導波モードから出発する描像が、近似的に透過特性を理解するのに適当であることが明らかになった(Phys. Rev. B **70** (2004) 235113)。2D-MPCでは、垂直入射からのわずかなずれによって偏光回転現象が起こることを見出したが、楕円率と回転角スペクトルが格子定数に依存することから、表面モードが関与していることを明らかにした(Appl. Opt. **43** (2004) 1412)。また、透過率が孔の面積比に比べて大きくなるという異常透過現象についても、表面モードが関与していることを示した(Appl. Phys. Lett. **84** (2004) 2742)。さらに、2D-MPCを2枚積層した系では、表面モード間の近接場相互作用により、奇妙な透過特性が現れることを見出した(Phys. Rev. B **71** (2005) 165408)。以上の他、ドーパされたシリコンや量子常誘電体 SrTiO_3 で作製した2次元フォトニック結晶について、透過スペクトルの温度依存性を測定し、極めて興味深い結果が得られている。

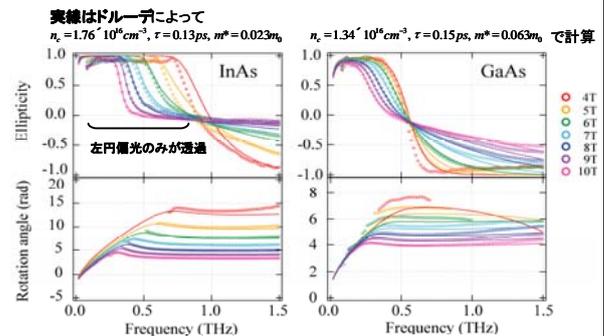


図 2 n 型 InAs と GaAs における磁気光学効果

4. バイオ関連試料への応用

アミノ酸のスペクトルを測定し、鏡像異性体の D と L 体単体と D、L の化合物であるラセミ体ではスペクトルが全く異なることを見出し、この結果を鏡像異性体の成分比決定に応用できることを示した(Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 053903)。さらに、アミノ酸が複数繋がったペプチドやタンパク質のスペクトルとその温度変化を測定し、生体分子の特徴について考察を行なった。

5. CW マルチモードレーザーダイオードを用いた超安価・コンパクトシステムの開発

安価な CW マルチモードレーザーダイオードで、高価なフェムト秒レーザーを代用する新しい原理に基づくテラヘルツ分光システム(Poor man's THz-TDS)を実用化レベルまで高性能化するため、シングルモードファイバーを用いたシステムを試作し、格段の S/N 比向上を確認した(Appl. Phys. Lett. **85** (2004) 881)。

⑧特記事項 (これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。)

研究代表者は、平成11～13年度の科研費特定領域研究(B)「レーザー・テラヘルツ波工学の開拓」で領域代表を務め、黎明期における我が国のテラヘルツ科学技術の発展に寄与した。最近、テラヘルツ技術が世界的に非常に注目され、大型のプロジェクトがいくつも遂行されている。テラヘルツ波の科学技術分野が、非常に広範な広がりを見せている中で、本研究のテラヘルツ分野全体での位置付けは申請当初とはかなり変化してきていると考えている。申請時は、我が国におけるテラヘルツ研究グループは非常に限られており、他分野への波及効果は大きいと考えられるものの、各分野からの視線は比較的冷やかであった。しかし、「ナノテク」同様、「テラヘルツ」のキーワードが我が国の重点研究施策にも取り上げられ、マスコミにも報道されるようになってくるとともに、多くの他分野の研究者がテラヘルツ分野になだれ込んで来ているのが現状である。本研究では、当初、これまでの経験を踏まえて、バランス良くレーザー励起テラヘルツ波の発生から応用までを研究することを考えていたが、「テラヘルツ波が何に使えるのか」が緊急の課題になりつつあることを考慮して、前倒し的に、様々な応用展開を積極的に行なっている。

社会的なインパクトという点では、テラヘルツ波の紙、プラスチックに対する透過性と、分子性結晶では比較的鋭いスペクトル線が得られるということから行なった、封筒中のプラスチック爆弾の検知のデモンストレーションは大きな反響があった。新聞で紹介されるとともに、国際会議でもプレスインタビューを受けた。テラヘルツ波を用いたペットボトル中の引火性液体の判別も注目を集め、これをより簡便なマイクロ波を使用することにより小型化した実用機が、関西国際空港で試験運用されて実績を上げた。医学者との共同研究では、人工関節に使用される超高分子量ポリエチレンが使用前の滅菌のためのガンマ線照射で劣化する様子をテラヘルツスペクトルで検査できることを示した。これは、高分子材料の汎用な劣化評価手段としてテラヘルツ波が有用である可能性を示している。

アミノ酸のスペクトル測定から、鏡像異性体であるD、L体単体の場合と、DとLが化合したラセミ化合物の場合ではテラヘルツスペクトルが全く異なることを始めて示し、このことを利用すれば未知の試料のDとL体の比率を測定することができることを明らかにした。これは新しい化学分析手法といえる。このことも含めて、日本分析学会関西支部の要請を受けて、最近のテラヘルツ波技術に関するセミナーを行なったが、この種のセミナーとしては近年にない人数の参加者があった。バイオ関連では、アミノ酸が結合したペプチドやタンパク質のスペクトルの温度変化を従来にない精度で測定しており、生物物理の分野でも注目され始めている。まだ予備実験の段階であるが、従来高価で大型の中性子散乱施設に頼ってきたタンパク質のダイナミクスの研究を、簡便に測定できるテラヘルツ分光装置である程度代替できる可能性について目処がついてきた。高価な中性子散乱施設を有効利用するための試料選別をテラヘルツスペクトルで行なうというコンセプトで、理研、高エネルギー加速器研究機構との打合せも行なっている。

マイクロ波帯では試料が非常に大きくなり、また逆に、光領域では極めて精度の高い試料が要求され、信頼性の高い測定が困難だったフォトニック結晶やメタマテリアルの実験が、テラヘルツ波を使うとセンチオーダーの試料で高精度での測定が可能である。研究代表者らは、この点にいち早く着目し、誘電体及び金属フォトニック結晶のテラヘルツ波透過特性の測定を行なってきた。2次元誘電体球配列フォトニック結晶では、透過、位相シフトスペクトルとも実験と理論が極めて良く一致し、我が国のフォトニック結晶の創始者の一人であり、誘電体球フォトニック結晶の厳密計算法を長らく開発してきた千葉大の大高教授などから高い評価を受けた。金属フォトニック結晶についても、新しい偏光回転現象を見出すなど、電磁波と微細構造を有する金属との相互作用に関する独自の実験結果を多数発表している。これらの結果は、「金属粉末を圧縮整形したものをマイクロ波で焼結可能」という不思議な現象を探るための手掛かりになるということで、この方面との共同研究も計画している。

その他、液晶の分子ダイナミクス、半導体材料の評価、薬剤の多形判定の評価などへの応用について、他大学、企業、大阪府警科捜研などと共同研究を行っており、「テラヘルツ波の応用」は着実に他分野並びに社会に浸透しつつある。また、テラヘルツ波の様々な応用についての研究成果により、Int. Conf on Ultrafast Phenomena, Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, American Chemical Society 主催のセミナーなどから招待講演を依頼された。

⑨研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)

論文、著書

萩行正憲、谷 正彦、長島 健 (解説)

「テラヘルツ波応用技術」

応用物理学会誌 **74** (6), 2005年 掲載予定

M. Tanaka, F. Miyamaru, M. Hangyo, T. Tanaka, M. Akazawa and E. Sano

"Effect of a thin dielectric layer on terahertz transmission characteristics for metal hole arrays"

Opt. Lett. **30** (10), 2005年 掲載予定

萩行正憲、谷 正彦 (解説)

「テラヘルツ技術の多様な研究と応用」

光技術コンタクト **43** (4), pp. 173-188 (2005)

萩行正憲

「第8章 テラヘルツ波による物質分析」 pp. 232-275

「第10章 テラヘルツ波による生化学研究」 pp. 308-329

テラヘルツ波の基礎と応用, 西澤潤一編著 (工業調査会, 2005)

○F. Miyamaru and M. Hangyo

"Anomalous terahertz transmission through double-layer metal hole arrays by coupling of surface plasmon polaritons"

Phys. Rev. B **71** (16), pp. 165408-1-5 (2005)

T. Nagashima, K. Takata, S. Nashima, H. Harima and M. Hangyo

"Measurement of electrical properties of GaN thin films using terahertz-time domain spectroscopy"

Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2), pp. 926-931 (2005)

○M. Yamaguchi, F. Miyamaru, K. Yamamoto, M. Tani and M. Hangyo

"Terahertz absorption spectra of L-, D-, and DL-alanine and their application to determination of enantiometric composition"

Appl. Phys. Lett. **86** (5), pp. 053903-1-3 (2005)

谷 正彦、山口真理子、山本晃司、萩行正憲 (解説)

「生体関連分子のテラヘルツ時間領域分光」

OPTRONICS 2004年11月号, pp. 146-151

F. Miyamaru and M. Hangyo

"Polarization characteristics of metallic photonic crystals in terahertz region"

Nanophotonics, ed. H. Masuhara and S. Kawata, (Elsevier, Amsterdam, 2004) pp. 313-330

T. Kondo, S. Yamaguti, M. Hangyo, K. Yamamoto, Y. Segawa and K. Ohtaka

"Refractive index dependence of the transmission properties for a photonic crystal array of dielectric spheres"

Phys. Rev. B **70** (23), pp. 235113-1-6 (2004)

K. Yamamoto, M. Yamaguchi, M. Tani, M. Hangyo, S. Teramura, T. Isu and N. Tomita

"Degradation diagnosis of ultrahigh-molecular weight polyethylene with terahertz-time-domain spectroscopy"

Appl. Phys. Lett. **85** (22), pp. 5194-5196 (2004)

O. Morikawa, M. Fujita and M. Hangyo

"Improvement of signal-to-noise ratio of subterahertz spectrometer using a continuous-wave multimode laser diode by single-mode fiber optics"

Appl. Phys. Lett. **85** (6), pp. 881-883 (2004)

萩行正憲、宮丸文章、田中優紀、谷 正彦 (招待論文)

「テラヘルツ時間領域分光法で見るフォトニック結晶」
信学技報 MW2004-95, OPE2004-85 (2004-07), pp. 165-170

谷 正彦、山口真理子、米良泰次郎、宮丸文章、山本晃司、萩行正憲 (解説)

「テラヘルツ電磁波発生とその分光・イメージング応用」
電子情報通信学会誌 **87** (8), pp. 718-725 (2004)

M. Nakajima, K. Uchida, M. Tani and M. Hangyo

"Strong enhancement of terahertz radiation from semiconductor surfaces using MgO hemispherical lens coupler"

Appl. Phys. Lett. **85** (2), pp. 191-193 (2004)

T. -A. Lin, M. Tani, M. Nakajima, M. Hangyo, K. Sakai, S. Nakashima and C. -L. Pan

"Ultrabroadband terahertz field detection by proton-bombarded InP photoconductive antennas"

Opt. Express **12** (13), pp. 2954-2959 (2004)

F. Miyamaru, T. Yonera, M. Tani and M. Hangyo

"Terahertz two-dimensional electrooptic sampling using high speed complimentary metal-oxide semiconductor camera"

Jpn. J. Appl. Phys. **43** (4A), pp. L489-L491 (2004)

○K. Yamamoto, M. Yamaguchi, F. Miyamaru, M. Tani, M. Hangyo, T. Ikeda, A. Matsushita, M. Tatsuno and Y. Minami

"Noninvasive inspection of C-4 explosive in mails by terahertz time-domain spectroscopy"

Jpn. J. Appl. Phys. **43** (3B), pp. L414-L417 (2004)

F. Miyamaru and M. Hangyo

"Polarization response of two-dimensional metallic photonic crystals studied by terahertz time-domain spectroscopy"

Appl. Opt. **43** (6), pp. 1412-1416 (2004)

F. Miyamaru and M. Hangyo

"Finite size effect of transmission property for metal hole arrays in subterahertz region"

Appl. Phys. **84** (15), pp. 2742-2744 (2004)

M. Nakajima and M. Hangyo

"Study of THz radiation from semiconductor surfaces excited by femtosecond laser pulses under laser illumination"

Semicond. Sci. Technol. **19**, pp. S264-S266 (2004)

谷 正彦、山口真理子、宮丸文章、山本晃司、萩行正憲 (解説)

「テラヘルツ電磁波パルスを用いた生体分子分光」

光アライアンス 2004年1月号, pp. 9-14

萩行正憲

「第4章 テラヘルツ波の発生 4.1 概論 4.2 光整流機構 4.3 光伝導効果」

超高速光エレクトロニクス技術ハンドブック, 小林孝嘉監修 (リアライズ理工センター, 2004) pp. 159-183

国際会議、学会発表

F. Miyamaru, M. Tanaka and M. Hangyo (Invited Keynote)

"Strong effect of surface structures for the transmission property of metal hole arrays in sub-terahertz region"

2004 Joint 29th Int. Con. on Infrared and Millimeter Waves and 12th Int. Con. on Terahertz Electronics, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, Sept. 27- Oct.1, 2004, Paper No. M7.1

上記国際会議では、他6件

F. Miyamaru and M. Hangyo (invited)

"Temporal spectroscopic behavior of terahertz pulses transmitted through metal hole arrays"

14th Int. Conf. on Ultrafast Phenomena, Niigata, Japan, July 25-30, 2004, Paper No. FB4

上記会議では、他 4 件

K. Yamamoto, M. Yamaguchi, F. Miyamaru, M. Tani, M. Hangyo, T. Ikeda, A. Matsushita, K. Koide, M. Tatsuno and Y. Minami

"Inspection of C-4 mail bomb by terahertz spectroscopy"

CLEO/IQEC 2004, San Francisco, USA, May 16-21, 2004, Paper No. CMG4

上記会議では、他 3 件

F. Miyamaru and M. Hangyo

"Crossover from metallic to dielectric slab-type photonic crystals in sub-THz region"

Int. Symp. on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V (PECS V)(Kyoto, Japan, March 7-11, 2004)

上記会議では、他 1 件

K. Yamamoto, M. Yamaguchi, F. Miyamaru, M. Tani and M. Hangyo, T. Ikeda, A. Matsushita, K. Koide, M. Tatsuno and Y. Minami

"Detection of hidden C-4 explosives in mails by terahertz spectroscopy and terahertz imaging"

The 5th Pacific Rim Conf. on Lasers and Electro-Optics, Paper No. PD-(4)-4 (Postdeadline Papers Digest, pp.9-11) (CLEO/Pacific Rim 2003, Taipei, Taiwan, December 15-19, 2003)

上記会議では、他 1 件

M. Yamaguchi, F. Miyamaru, K. Yamamoto, M. Tani and M. Hangyo

"Terahertz time-domain spectroscopy of crystalline amino acids"

16th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS 2003, October 28, 2003, Tucson, AZ), Paper No. TuR2 (Conference Proceedings Vol. 1, pp.326-327)

M. Yamaguchi, F. Miyamaru, K. Yamamoto, M. Tani and M. Hangyo

"Temperature dependence of low-frequency vibrational modes in crystalline amino acids studied by terahertz time-domain spectroscopy"

The 28th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves (IRMMW 2003, Ohtsu, Japan, September 29, Paper No. M9-4 (Conference Digest, pp.91-92)

上記会議では、他 6 件

T. Nagashima, M. Tanaka and M. Hangyo

"Excitation of two-dimensional plasmon polariton in YBCO thin films in the THz wave region"

11th Int. Conf. on Terahertz Electronics (THz 2003, Sendai, Japan, September 24, Paper No. C-2 (Conference Digest, p.14)

上記会議では、他 6 件

F. Miyamaru and M. Hangyo

"Polarization characteristics of metallic photonic crystals in terahertz region"

The Int. Nanophotonics Symp. Handai (July 24~26, 2003, Osaka Univ., Osaka Japan)

M. Nakajima and M. Hangyo

"Study of THz radiation from semiconductor surfaces excited by femtosecond laser pulses under laser illumination" The 13th Int. Conf. on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS-13), Jul. 28-Aug. 1, 2003, Modena, Italy, Abstracts P Th6-1

T. Yonera, M. Tani and M. Hangyo

"THz Imaging System Based on 2D-EO Sampling with a CMOS Camera"

The 10th Int. Workshop on Femtosecond Technology (FST 2003), WP-44, (July 16-17, 2003, Makuhari Messe Chiba, Japan)

上記会議では、他 2 件