強相関電子系材料からのテラヘルツ電磁波放射と関連物性

斗内 政吉, 貴田 徳明, 紀和 利彦, 富成 征弘, 川山 巖, 村上 博成

大阪大学 超伝導フォトンクス研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Terahertz Radiation from Strongly Correlated Electron Systems and Related Phenomena

Masayoshi TONOUCHI, Noriaki KIDA, Toshihiko KIWA, Yukihiro TOMINARI,

Iwao KAWAYAMA, and Hironaru MURAKAMI

Research Center for Superconductor Photonics, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

(Received January 10, 2002)

We review the study on terahertz (THz) beam generation from strongly correlated electron systems; $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ (PCMO), $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Ti2212), and $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212) thin films. Remarkable difference in their emission properties and those from semiconductors or $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) is observed. The ultrafast carrier dynamics in the optically excited YBCO thin films is also discussed on the basis of its THz emission properties. Furthermore, we report new results on the THz time domain spectroscopic studies of PCMO, $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$, Bi2212, and $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ thin films.

Key Words: Strongly correlated electron system, Terahertz radiation, Manganites, High-Tc superconductor, Ultrafast phenomena

1. はじめに

強相関電子系材料, 特に, ペロブスカイト型超伝導体, Mn酸化物, 強誘電体は, エレクトロニクス応用への期待も大きく, 非常に幅広く研究されている. それら材料における超高速光応答の研究は, オプトエレクトロニクス素子, 光マイクロ波変換素子, 量子コンピュータ開発などに直結した, 新機能創製に必要な不可欠な研究分野と位置付けることができる. そのような認識は, 国内外で共有され, 日本では, 産業技術総合研究所強相関電子技術研究センターが設立されるなど活発な展開を見せている^{1,*,**}). 我々は, そのような課題の一つとして, 強相関電子系材料からのフェムト秒レーザー励起テラヘルツ電磁波放射ならびにテラヘルツ波物性の解明に取り組んでいる. 本稿では, その例として, Mn酸化物磁性体として初めての $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ (PCMO)からのテラヘルツ電磁波放射観測, $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Ti2212)からの電磁波放射におけるジョセフソンプラズマ励起に関係していると思われる集団励起モードの発見, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO)における超高速電荷ダイナミクスをテラヘルツ電磁波放射から議論する試み等について紹介するとともに, 時間領域テラヘルツ分光を用いて強相関電子系材料のテラヘル

ツ物性評価を行った結果, 特に, PCMO薄膜における電荷密度波形成に伴う集団励起モードの可能性, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212)における擬ギャップの周波数依存性, $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (SBT)薄膜におけるソフトモードの観測などの結果についても報告する.

本稿では, テラヘルツ電磁波の励起やその応答特性が物性評価に重要な情報をもたらすことを紹介することで, 本分野の重要性を指摘するものである. 紙面の都合上詳細な議論は行わないが, 詳しくは原著論文を参照していただきたい. 尚, テラヘルツ電磁波励起観測法ならびに時間分解テラヘルツ波分光法は, 低温成長GaAs光スイッチを用いるもので, 国内では, 通信総合研究所阪井博士・谷博士ならびに大阪大学萩行教授らが先駆的に開発してきた手法であり, これまでのレビューを参照していただきたい^{2,3)}.

2. $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ からのテラヘルツ電磁波放射

Mn酸化物は, 超巨大磁気抵抗 (Colossal Magnetoresistance, CMR) 効果を示すことが発見されて以来, 国内外で精力的に研究されており, 光応答に関する研究も多い⁴⁻⁷⁾. その結果, 高速な光誘起相転移が見出され, ま

* 花村 榮一: URL: <http://www.chitose.ac.jp/textascitildekyoin/person/hanamura/Crest/>

** 産業技術総合研究所強相関電子技術研究センターホームページ: URL: http://www.aist.go.jp/aist_j/organization/research_center/cerc/cerc_main.html

た、光スイッチなどへの応用も検討されている。Mn酸化物の代表的材料として、低温で強磁性金属となる $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($0.16 < x < 0.5$)等と、低温で反強磁性絶縁体となる $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ($x < 0.5$)等がある。そのうち、前者は、光に対して、高速応答を示すものの、金属的であるゆえテラヘルツ電磁波放射材料には適していない。一方、後者は、0.5 eV程度のエネルギーギャップを有するため、光励起による電荷変調が期待される。

本研究では、後者の薄膜についてテラヘルツ電磁波励起を試みた⁸⁾。まず、レーザーアブレーション法により、膜厚150 nmのPCMO薄膜を作製し、その薄膜上にギャップ間隔5 μm のボウタイ型Auアンテナを加工し、光スイッチを作成した。Fig. 1に、PCMOスイッチからのテラヘルツ電磁波放射波形の一例を示す。試料温度23 K、印加電圧32 V、励起レーザーパワー188 mWとした時の結果で、時間約24 ps付近にパルス電磁波が放射されていることがわかる。その周波数成分として、中心周波数約300 GHz、最大励起周波数約1 THz(挿入図)を有している。放射スイッチおよび検出器ともにボウタイ型アンテナを用いているため中心周波数は低くなっているが、半導体や高温超伝導体と同様なテラヘルツ電磁波放射が、Mn酸化物からも初めて観測された。周波数成分において、約700 GHz近傍に若干の窪み(図中矢印参照)が見られるが、これはテラヘルツ波分光の結果から集団励起モードによる吸収によって生じていると示唆された。詳しくは、後述する。

興味ある放射特性として、その温度依存性が挙げられる。テラヘルツ電磁波の最大振幅の温度上昇に伴う変化をFig. 2(a)に示す。まず、振幅は単調に減少するが、約120 Kの点で、増加に転じる。その後、上昇を続け、230 K付近で再び減少に転じている。同試料の磁化ならびに抵抗の温度依存性をFig. 2(b)に示す。磁化は、印加磁場500 Oeにおける磁場中冷却(FC, ●)とゼロ磁場冷却(ZFC, ○)における結果で、Mnサイトあたりのボーア磁子(μ_B)で示している。約140 Kで磁化は増大を始め、約80 K以下でFCとZFCの特性が異なる振る舞いを示している。これらの温度は、一般的に報告されている、PCMOの反強磁性転

Fig. 1 Time-resolved waveform radiated from PCMO bow-tie antenna. The inset shows the corresponding Fourier spectrum.

Fig. 2 Temperature dependence of (a) the maximum THz amplitude emitted from PCMO photoswitch and (b) magnetization and resistance of the prepared PCMO thin film.

移温度(T_{CN})とスピンキヤント転移温度(T_{CA})に一致している。抵抗の温度依存性は、温度の低下に伴って、急激に抵抗が上昇する絶縁体的挙動を示している。本試料の電荷・軌道整列温度($T_{co/oo}$)は特定できないが、テラヘルツ電磁波放射特性の高温側での最大点は、PCMOの一般的な $T_{co/oo}=220$ Kにはほぼ一致している。なお、磁化の磁場依存性において明瞭なヒステリシスループが観測され、低温において電荷整列していることが示唆されている。

以上の結果から、Mn酸化物からのテラヘルツ電磁波放射は、単なる光励起キャリアの運動ではなく、スピン状態とも密接に関係していることが示唆された。今後は、テラヘルツ電磁波放射を観測することで、Mn酸化物系における高速スピンドायナミクスに関する新たな知見が得られることが期待され、応用展開とともに重要な研究テーマと位置付けることができる。

3. 高温超伝導体からの共鳴テラヘルツ電磁波放射

高温超伝導体YBCO薄膜からのテラヘルツ電磁波放射が発見されて以来、高出力化、詳細な電磁波放射特性の観測、超伝導電流イメージングシステムへの応用など、様々な展開を見せている⁹⁻¹²⁾。本稿では、それら進展のなかで応用上、重要な放射特性について簡単に紹介する。

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{4+2n+\delta}$ (BSCCO) および $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{4+2n+\delta}$ (TBCCO) は、その積層ペロブスカイト構造内において、c軸方向にジョセフソン接合を内在しており、極めてユニークな特性を有している。その構造を巧みに利用したジョセフソンプラズマ放射の実現は一つの大きな研究テーマとして、精力的に進められている。これは、磁場

を印加することにより、ジョセフソン接合内に平行にボルテックスが侵入し、その集団運動を誘起することで、外部への電磁波放射が可能であると期待されているものである。ここでは、磁場下でのTi2212薄膜からのテラヘルツ電磁波放射特性において、ジョセフソンプラズマ励起と思われる共鳴現象を確認することができたので¹³⁾、その結果について述べる。

Fig. 3に、c軸配向Ti2212薄膜(厚さ150 nm)ボウタイアンテナから、外部磁場(100 Oe)下において放射されたテラヘルツ電磁波放射波形を示す。YBCO薄膜からのテラヘルツ電磁波放射では、ほぼ単一電磁パルスが放射されるがTi系からの放射では、最初のパルスに続いて振動するパルスが放射されることが確認された。この振動周期は約600 GHzに対応する。挿入図に、周波数スペクトル成分を示すが、ここでも明らかに、約600 GHzにピークを持つ電磁波成分が放射されていることがわかる。一方、破線で示すように、電流バイアス時に放射されるテラヘルツ電磁波は、その特徴的な周波数スペクトルを示さず、通常の低周波領域に中心周波数を持つ、ボウタイアンテナからの放射特性となっている。600 GHz近傍にある共鳴周波数は、温度上昇とともにBCS的に減少し、それに対応して、ロンドン侵入長が24 Kで約26 μm 、70 Kで約62 μm に変化すると見積もられた。また、Bi2212¹⁴⁾及びTi2212からの放射特性はそれぞれ約200 GHz、700 GHzにカットオフ周波数が存在することも、Fig. 4より見て取れる。この結果からも、プラズマエッジがその近傍に位置し、磁場を印加することで、集団的な共鳴放射が発生しているものと考えられる。

以上の結果は、直接的観測が待ち望まれていたジョセフソンプラズマ放射が、光励起テラヘルツ電磁波放射として実現されている可能性を示唆するもので、今後フォトミキシングと組合せることで局部発振器など、様々な応用への展開が期待される。

Fig. 3 Time-resolved waveform radiated from Ti2212 bow-tie antenna under magnetic field of 100 Oe at 24K. The inset shows the corresponding Fourier spectrum (solid line) and the one emitted under bias current (dashed line).

Fig. 4 Normalized Fourier spectra of the THz radiation emitted from Bi2212 and Ti2212 bow-tie antennas under bias currents.

4. テラヘルツ電磁波と電荷ダイナミクス

テラヘルツ電磁波放射現象は、固体の超高速電荷ダイナミクスを反映したものである。半導体に対しては、様々な評価(過渡的ラマン分光法など)から、その電荷ダイナミクスの議論は成熟してきている。しなしながら、その様な状況の中でも、テラヘルツ電磁波放射により新しい現象が観測されている¹⁵⁾。一方、強相関系に対しては、その結晶の複雑さや不完全性から利用できる評価方法は限られたもので、例えば、多くの場合、ポンプ・プローブ反射率・透過率測定が用いられている。従って、テラヘルツ電磁波放射を、新材料系に対する電荷ダイナミクス評価技術として確立できるならば、物性評価の強力なツールとなるであろう。

YBCO薄膜からのテラヘルツ電磁波放射について、発見当初、BCS超伝導体に対するレート方程式を用いて、第1次近似的に、ダイナミクスを議論した¹⁶⁾。その議論から、300 fs以下の主要な緩和過程があることなどが示唆された。その様な議論を展開させるため、我々は現在、非平衡時のテラヘルツ電磁波放射を観測することで、詳細なダイナミクスの検討を試みている。具体的には、フェムト秒パルスをポンプ光とプローブ光に分岐し、プローブ光により励起されたテラヘルツ電磁波の振幅を、ポンプとプローブ間の時間遅延の関数として観測するもので、半導体でも一部利用されている¹⁷⁾。

Fig. 5に20 Kにおけるプローブテラヘルツの最大振幅と、ポンプ/プローブ時間遅延の関係を示す。パラメータは注入光子密度である。特徴的な応答は、一度減少した後、増加に転じ、オーバーシュートし、最大点に達した後、減少している。半導体では、このような複雑な動きは示さず、スクリーニングによる振幅の減少と、再結合による回復を表すのみである¹⁸⁾。本実験では、時間に対するゼロ点が設定できないため、まだ充分には議論できないが、おおよそ次のように解釈することができる¹⁹⁾。まず、光子の入射とその後の雪崩的対粒子破壊により、プローブ振幅が減少する。次いで、減少した電流を補うために残りの対粒子が加速さ

Fig. 5 Change of the maximum amplitude of the THz radiation excited by the probe pulse as a function of delay time between pump and probe pulses for various photon injection density. The signal is normalized by the maximum probe THz amplitude without the pump laser.

れ、回復に向う。この時同時に、ホット準粒子の緩和により、電子温度は数1000 Kにまで達する。この電子温度上昇により、テラヘルツ電磁波に対する透過率が増大し、オーバーシュートを見せる。その後、準粒子の再結合とともにプローブテラヘルツ振幅は減少していると解釈できる。まだ明確ではないが、著者は、その雪崩的対粒子破壊からオーバーシュートの頂点にかけて電流が変調されているのではないかと考えている。オーバーシュート頂点からの緩和過程を指数関数的に評価することで、緩和時間を見積もるとFig. 6のようになる。緩和過程は、2つの特徴的時間(τ_1 , τ_2)で記述され、ポンプパワーに関係なく一定の緩和時間を示す。この緩和時間 τ_2 は2 psと見積もられ、通常のポンププローブ反射率変化の結果と一致している²⁰⁾。次の約7 psのものは、以前議論した対粒子破壊時間に近い値であるが、ポンププローブ法ではまだ議論

Fig. 6 The time constants τ_0 , τ_1 , τ_2 extracted from the curves in Fig. 5 as a function of excitation power.

されていない。更に、始めの減少過程において、指数関数的に対粒子が増加するとして散乱時間(τ_0)を見積もると、約0.5 psと見積もることができる。これは、常伝導状態でのポンプ・プローブ実験で見積もられる緩和時間に一致し、ホットエレクトロンのバンド内緩和を表している可能性がある。

以上のように、テラヘルツ電磁波を観測することで、新材料系に対する高速電荷ダイナミクスの知見が得られることが大いに期待される。現在、通常のポンププローブ法と組合せたシステムを構築中であり、両者の比較から更に詳しい議論を試みている。

5. 強相関電子系材料のテラヘルツ波分光

現在、フェムト秒レーザー励起テラヘルツ電磁波放射が最も活躍しているのは、時間領域分光法への応用であり、半導体のみならず様々な分野で応用が始まっている。強相関電子系材料の評価においても、強力なツールとして期待される。高温超伝導体に対して、その複素導電率が評価できることから、速い段階からその物理学的実験手法として適用されてきた。その様な中、我々が行ってきたTDS評価において興味ある結果が得られているので紹介する。

高温超伝導体であるBi2212薄膜(膜厚50 nm, $T_c = 76$ K)の試料に対して、透過型TDSにより評価した²¹⁾。Fig. 7に光学導電率の虚数部の温度依存性を示す。ここでは、3種の周波数(0.33, 1.0, 1.5 THz)について示している。低温に向って T_c 近傍で σ_2 が急激に増大し、通常の超伝導転移が T_c 近傍で発現しているのが見て取れる。このとき、高周波成分(1.0, 1.5 THz)のみの σ_2 が、230 K($\sim T^*$)近傍から低温側で、有限値を示していることが見出された。 T^* では、抵抗の温度変化並びに光の透過率においても変化が確認され、高温超伝導体における擬ギャップの発現に関係しているものと思われる。即ち、擬ギャップの振る舞いに強い周波数依存性があることから、高速散乱あるいは局在的散乱が強く関与しているものと思われる。

Fig. 7 Temperature dependence of imaginary part of complex conductivity at 0.33, 1.0 and 1.5 THz. The closed symbols represent the data expanded by 5 times in the vertical scale.

Fig. 8 Real part of optical conductivity as a function of photon energy for two samples.

次に、Mn酸化物に対するTDS測定結果を議論する^{22,23)}。Fig. 8に2つの異なるPCMOサンプル(作成条件は同じ)において低温にて測定された複素導電率の実部を示す。Sample Aでは3.3 meV付近に、Sample Bでは2 meV付近にピークが観測されている。この特性は、約220 Kから発現し、温度の低下とともに増大する。この振る舞いはその他特徴も含めて、Grünerらが系統的に調べた様々な材料の電荷密度波(CDW)形成に伴う集団励起モードの特徴と酷似している²⁴⁾。このことから、Fig. 1で確認されたテラヘルツ電磁波放射時の窪みは、集団励起モードの吸収に基づくものであると推察され、Mn酸化物においてCDWが存在する可能性を初めて指摘した。

また、 $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ 薄膜に対してもTDSを適用した。この薄膜は、絶縁体・金属転移温度 T_{IM} として約230 Kを示した。TDS評価の結果、低温では、金属相を反映してドルーデ応答を示すが、 $0.7T_{IM}$ 以上でドルーデ応答が消失することなども見出されている²³⁾。

最後に、強誘電体であるSBT薄膜のTDS実験結果についても紹介する²⁵⁾。PLD法によりMgO基板上に膜厚500～4000 nmのc軸配向膜を作製し、室温で評価した。Fig. 9に、波数10～80 cm^{-1} における2種のサンプルの誘電関数(虚部) ϵ_2 スペクトルを示す。ここでは、波数30 cm^{-1} と60 cm^{-1} に明瞭なピークが観測されている。KojimaはSBTのラマン分光から、29 cm^{-1} と59 cm^{-1} において、“soft mode”と“rigid layer mode”に対応するラマン散乱を観測しており、今回のTDS結果と酷似している²⁶⁾。即ち、TDSによって、SBT薄膜のソフトモードが明瞭に観測されていると思われる。

その他、高温超伝導高周波デバイス開発に向けて、表面インピーダンスの見積りや、高周波基板の評価にも威力を発揮しており^{27,28)}、テラヘルツ時間領域分光法は、次世代電子材料の評価技術として、その地位を確実なものにしつつあるといえる。今後は、低価格化とともに、利用面での汎用性を重視したもの、或いは目的別に特化したものなどコンパクトシステム化が重要な鍵を握るであろう。

6. まとめ

以上、我々は最近の研究テーマである強相関電子系材

Fig. 9 Dielectric function ϵ_2 vs wave number for two samples.

料に対して、フェムト秒レーザー応答としての、テラヘルツ電磁波放射現象を観測し、放射現象そのものが、物質科学の重要な情報源となること、また、テラヘルツ波応答からも、その物質の様々な基本物性抽出が可能であることなどを紹介した。このような情報の抽出から、超高速光・テラヘルツ波機能の創製につながり、新しいデバイスの発現につながってほしいと願っている。

謝 辞

BSCCO薄膜のテラヘルツ分光は、東京工業大学井口家成教授、内山 哲治博士、通信総合研究所王 鎮博士との共同研究であり、TBCCO薄膜からのテラヘルツ電磁波放射ならびにYBCO薄膜における電荷ダイナミクスの観測はイエナ大学Seidel教授およびWald博士との共同研究の成果である。また、日頃よりご協力いただいております通信総合研究所阪井 清美博士、谷 正彦博士ならびに大阪大学萩行 正憲教授に感謝いたします。本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究B(12450146および13555107)、ならびに科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業の援助を受け行われた。

参考文献

- 1) 十倉 好紀: 固体物理 **36** (2001) 743.
- 2) 阪井 清美, 谷 正彦: 応用物理 **70** (2001) 149.
- 3) テラヘルツ電磁波発生特集号: レーザー研究 **26** (1998).
- 4) Y. Tokura and Y. Tomioka: J. Magn. Magn. Mater. **200** (1999) 1.
- 5) Y. Tokura (ed): *Colossal Magnetoresistive Oxides* (Gordon and Breach Science, New York, 2000).
- 6) M. Fiebig, K. Miyano, Y. Tomioka, and Y. Tokura: Appl. Phys. B **71** (2000) 211.
- 7) X. J. Jiu, A. Machida, Y. Moritomo, M. Ichida, and A. Nakamura: Jpn. J. Appl. Phys. **39** (2000) L670.
- 8) N. Kida and M. Tonouchi: Appl. Phys. Lett. **78** (2001) 4115.
- 9) M. Hangyo, S. Tomozawa, Y. Murakami, M. Tonouchi, M. Tani, Z. Wang, K. Sakai, and S. Nakashima: Appl. Phys. Lett. **69** (1996) 2122.
- 10) M. Tonouchi, H. Saijo, M. Hangyo, O. Morikawa, P. Gu, M. Tani, and K. Sakai: Physica C **357** (2001) 1600.
- 11) S. Shikii, T. Kondo, M. Yamashita, M. Tonouchi, and M. Hangyo: Appl. Phys. Lett. **74** (1999) 1317.

- 12) M. Tonouchi, M. Yamashita, and M. Hangyo: J. Appl. Phys. **87** (2000) 7366.
- 13) Y. Tominari, T. Kiwa, H. Murakami, M. Tonouchi, H. Wald, H. Schneidewind, and P. Seidel: Appl. Phys. Lett. **80** (2002) 3147.
- 14) H. Murakami, T. Kiwa, M. Tonouchi, T. Uchiyama, I. Iguchi, and Z. Wang: Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 1992.
- 15) R. Huber, F. Tauser, A. Brodschelm, M. Bichler, G. Abstreiter, and A. Leitenstorfer: Nature **414** (2001) 286.
- 16) M. Tonouchi, M. Tani, Z. Wang, K. Sakai, N. Wada, and M. Hangyo: Jpn. J. Appl. Phys. **35** (1996) L1578.
- 17) B. B. Hu, E. A. de Souza, W. H. Knox, J. E. Cunningham, M. C. Nuss, A. V. Kuznetsov, and S. L. Chuang: Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 1689.
- 18) M. Tonouchi, N. Kawasaki, T. Yoshimura, H. Wald, and P. Seidel: Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 印刷中.
- 19) 斗内 政吉: 電子情報通信学会論文誌 C J85-C (2002) 323.
- 20) S. G. Han, Z. V. Vardey, K. S. Wong, and O. G. Symko: Phys. Rev. Lett. **65** (1990) 2708.
- 21) H. Murakami, T. Kiwa, N. Kida, M. Tonouchi, T. Uchiyama, I. Iguchi, and Z. Wang: cond-mat/0106132.
- 22) N. Kida and M. Tonouchi: Phys. Rev. B **66** (2002) 印刷中.
- 23) N. Kida, M. Hangyo, and M. Tonouchi: Phys. Rev. B **62** (2000) R11965.
- 24) 貴田 徳明: 大阪大学大学院工学研究科博士論文.
- 25) I. Kawayama, K. Kotani, and M. Tonouchi: submitted to Jpn. J. Appl. Phys.
- 26) S. Kojima: J. Phys.: Condens. Mater **10** (1998) L327.
- 27) T. Kiwa and M. Tonouchi: Physica C **362** (2001) 314.
- 28) T. Kiwa and M. Tonouchi: Jpn. J. Appl. Phys. **40** (2001) L38.

レーザーワード

強相関電子材料 (strongly correlated electron system)

強相関電子材料とは、電子間の相互作用が強く、従来の半導体で成功した一電子近似が成り立たない物質群 (有機物, 無機物) の事を指す. 次世代の産業電子技術の中核をなすと考えられる新規な現象 (高温超伝導, 超巨大磁気抵抗効果, 良好な熱電特性等) や物性 (軌道秩序, スピンフラストレーション等) が相次いで発見された事から, 固体物理学の新たな未開拓分野として成長し続けている.

最近では, 光等の僅かな外場によって電子相を劇的に制御できる事が見出され, 光磁気変換デバイス開発などへの新たな潮流を生み出している. 代表的な強相関電子材料として $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 等の高温超伝導体, 巨大磁気抵抗効果を示す $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$, 不揮発強誘電体である BaTiO_3 , 良好な熱電特性を示す NaCo_2O_4 , 幾何学的フラストレーションが発現する $\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 等が挙げられる. (斗内 政吉)