

第3回 低温センター—研究交流会 概要集

- 日 時 : 平成24年3月5日(月) 10:00 ~ 17:55
- 会 場 : 小柴ホール(理学部1号館、中央棟2F)

第3回 低温センター研究交流会・利用者懇談会

- 日時 : 平成24年3月5日(月) 10:00 ~ 17:55
- 会場 : 小柴ホール(理学部1号館、中央棟2F)
- 講演時間 : 20分(質疑応答5分を含む)

10:00-10:10 はじめに 朝光 敦 (低温センター准教授)

セッション1 (10:10-12:10) 座長: 下山 淳一 (工学系研究科・准教授)

10:10-10:30 中嶋 正敏 農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・准教授(生物制御化学研究室)

O-01 植物ホルモン受容体の信号伝達制御に関する研究

10:30-10:50 生井 飛鳥 理学系研究科・化学専攻・特任助教(大越研究室)

O-02 金属置換型イプシロン酸化鉄の合成と高周波ミリ波領域における磁気光学効果の観測

10:50-11:10 樋口 卓也 工学系研究科・物理工学専攻・D3(五神研究室)

O-03 ZnO量子井戸中の残留キャリアによる内部電場遮蔽長の測定

11:10-11:30 鈴木 剛 理学系研究科・物理学専攻・D2(島野研究室)

O-04 高密度励起半導体における電子・正孔系の相転移ダイナミクス

11:30-11:50 宗田 伊理也 工学系研究科・電気系工学専攻・D1(田中・大矢研究室)

O-05 強磁性半導体 GaMnAs 量子井戸二重障壁構造における共鳴トンネル分光法を用いたフェルミ準位の観測

11:50-12:10 加地 弘樹 工学系研究科・バイオエンジニアリング専攻・M2(田畑研究室)

O-06 バイオミネラリゼーションを利用したナノスピントロニクス材料の作製とその物性に関する研究

12:10-13:00 昼食

ポスターセッション (13:00-14:30)

セッション2 (14:30-15:50) 座長: 島野 亮 (理学系研究科・准教授)

14:30-14:50 畠山 修一 工学系研究科・バイオエンジニアリング専攻・M2(高橋研究室)

O-07 超伝導転移端センサを用いた硬X線・γ線スペクトロメータの開発

14:50-15:10 重松 圭 理学系研究科・化学専攻・M2(長谷川研究室)

O-08 面内異方的格子歪みを受けたペロブスカイトマンガン酸化物薄膜に対するルテニウム置換効果

15:10-15:30 平田 倫啓 工学系研究科・物理工学専攻・D3(鹿野田研究室)

O-09 質量ゼロの電子がおりなす特異な磁場応答と対称性に関する有機物結晶をもちいた核磁気共鳴研究

15:30-15:50 中村 顕 農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・特任助教(食品工学研究室)

O-10 強磁場利用によるタンパク質結晶高品質化の試み

15:50-16:10 休憩

セッション3 (16:10-17:30) 座長: 鹿野田 一司 (工学系研究科・教授)

16:10-16:30 佐藤 大輔 理学系研究科・物理学専攻・D3 (福山研究室)

O-11 2次元平面に束縛したヘリウム3は液化するか?

16:30-16:50 荻野 拓 工学系研究科・応用化学専攻・助教 (岸尾研究室)

O-12 厚いブロック層を有する層状鉄ニクタイトの化学組成と超伝導特性

16:50-17:10 小塚 裕介 工学系研究科・物理工学専攻・助教 (川崎研究室)

O-13 MgZnO/ZnO ヘテロ界面における高移動度二次元電子ガスの量子ホール状態

17:10-17:30 林 稔晶 NTT 物性科学基礎研究所・社員 (工学系研究科・電気電子工学専攻・染谷・関谷研究室)

O-14 ペンタセン有機薄膜トランジスタにおけるゲート絶縁体界面トラップの研究

技術セッション (17:30-17:45) 座長: 朝光 敦 (低温センター・准教授)

17:30-17:45 戸田 亮 低温センター・技術職員

O-15 低温センター共同利用部門紹介

17:45-17:55 おわりに 福山 寛 (低温センター長)

18:00-20:00 低温センター利用者懇談会 会場: 小柴ホール ホワイエ

19:00- アワード授賞式

ポスター一覧 (13:00-14:30)

- P-01 田中 裕也 工学系研究科・応用化学専攻・M2 (岸尾研究室)
高温焼結ex-situ法によるMgB₂超伝導バルク体の作製と臨界電流特性
- P-02 レ デウック アイン 工学系研究科・電気系工学専攻・M1 (田中・大矢研究室)
n型強磁性半導体(In,Fe)Asの成長と物性
- P-03 伴 芳祐 工学系研究科・電気系工学専攻・D3 (田中・大矢研究室)
IV族強磁性半導体 GeFe における異常ホール効果とキャリア誘起強磁性の検証
- P-04 佐藤 彰一 工学系研究科・電気系工学専攻・D1 (田中・大矢研究室)
磁性体電極を持つ半導体デバイスの磁気伝導特性
- P-05 西川 哲郎 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (鹿野田研究室)
中性 - イオン性転移物質 TTF-CA の圧力下スピン状態
- P-06 竹原 陵介 工学系研究科・物理工学専攻・D1 (鹿野田研究室)
中性 - イオン性転移物質 TTF-CA の NI クロスオーバーにおける電気伝導機構の研究
- P-07 石川 恭平 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (鹿野田研究室)
有機導体 α -(ET)₂I₃の圧力下ディラック電子相における¹³C NMR測定
- P-08 杉山 一生 工学系研究科・総合研究機構・M2 (幾原研究室)
NiO 単結晶薄膜における局所磁性
- P-09 竹内 裕紀 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (岩佐研究室)
フラーレン超伝導体の比熱
- P-10 張 奕勁 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (岩佐研究室)
二硫化モリブデンを用いた電気二重層トランジスタ
- P-11 Joseph Falson 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (川崎研究室)
MgZnO/ZnO ヘテロ接合における強相関二次元キャリアの有効質量解析
- P-12 塚崎 敦 工学系研究科・附属量子相エレクトロニクス研究センター・特任講師 (塚崎研究室)
Co 添加 ZnO 系ヘテロ構造における異常ホール効果の観測
- P-13 金井 康 工学系研究科・物理工学専攻・D2 (樽茶・大岩研究室)
自己形成 InAs 量子ドットにおける g-テンソルの電氣的制御
- P-14 大塚 朋廣 工学系研究科・物理工学専攻・特任研究員 (樽茶・大岩研究室)
半導体量子ドット中の単一スピン操作の高速化
- P-15 藤田 高史 工学系研究科・物理工学専攻・D1 (樽茶・大岩研究室)
2重量子ドットでの単一光励起電子のドット間トンネリング検出

- P-16 吉見 龍太郎 工学系研究科・物理工学専攻・M1（十倉研究室）
PLD 法による Bi_2Se_3 単結晶薄膜の作製とキャリア制御
- P-17 Raphael Jan Bindel 理学系研究科・物理学専攻・研究員（福山研究室）
Towards the Band Gap Opening in Graphene
- P-18 尾崎 仁亮 理学系研究科・化学専攻・M2（大越研究室）
集積型コバルト-オクタシアノタングステン金属錯体の光磁性現象
- P-19 中川 幸祐 理学系研究科・化学専攻・D2（大越研究室）
プルシアンプルー類似体における高プロトン伝導の観測
- P-20 箱江 史吉 理学系研究科・化学専攻・D1（大越研究室）
ラムダ型五酸化三チタンにおける光可逆金属—半導体転移
- P-21 関原 貴之 理学系研究科・物理学専攻・D1（岡本研究室）
GaAs 劈開表面上に形成した金属超薄膜の超伝導
- P-22 桑原 直之 薬学系研究科・蛋白構造生物学教室・特任助教
繊維化疾患治療に向けた核内レセプターリガンドの創製とその複合体の構造科学的解明
—液体窒素温度と室温で測定された構造をもとに—
- P-23 阿部 美玲 低温センター・技術職員
平成 23 年度 低温センター寒剤供給業務
- P-24 秋山 了太 工学系研究科・電気系工学専攻・D3（田中・大矢研究室）
Ge(111)基板上 $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$ 磁性半導体における構造と磁性: 構造的均一性と不均一性の影響

Oral Presentation

O-01 植物ホルモン受容体の信号伝達制御に関する研究

農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・生物制御化学研究室
中嶋正敏, 朴昇玟, 鈴木浩之, 北村 淳, 大久保杏子, 浅見忠男

植物ホルモンとして知られるジベレリンは、種子の発芽や茎の伸長促進、花芽形成など植物の生活環における様々なプロセスを制御している。ジベレリンの受容体 Gibberellin Insensitive Dwarf1(GID1)は、最初にイネ・ジベレリン非感受性突然変異体の原因遺伝子産物として同定され[1]、続いてシロイヌナズナから3種のオルソログ受容体の存在が明らかとなった[2]。我々は、これら3種の受容体間の機能的差異を明らかにすべく、シロイヌナズナ受容体に関する機能欠失型多重変異体を作成・解析した。それによれば、3通りの二重変異体のうち1種のみ矮化傾向を認め、それとは別の1種のみ雄しべの伸長不良と稔実率の低下を認めた[3]。各受容体遺伝子の発現部位を探るべく、プロモーター-GUS融合遺伝子を発現する形質転換体を作成・解析したところ、上記二重変異体に現れた異常形質のうち単に正常な受容体の量的欠乏が原因である場合と、それだけではうまく説明できない場合があると判明した[4]。

ジベレリンの信号伝達は、ジベレリンに依存して受容体の性状が変化し、新たに「信号伝達の抑制因子 DELLA」への親和性が生じて受容体-DELLA間で複合体を形成することが端緒となる。そして、その複合体の形成に伴いDELLA因子の機能が弱まるため以降に信号が伝えられる。そこで、受容体間の機能的差異としてシロイヌナズナでは5種存在するDELLA因子との相互作用時に何らかの質的差異が存在すると想定し、計15通りある受容体-DELLA間の親和性について酵母を用いる比較評価系を構築した。これを用いた解析から、雄しべの伸長不良が現れる上記二重変異体では、唯一正常に機能する受容体と「雄しべにおいて支配的に存在するDELLA因子」との間の親和性が総じて低い傾向にあることが判明し、低親和性を本質とする機能的劣性が異常形質を生じさせる要因と考えて矛盾ない結果を得た[4]。

さらに2008年、ジベレリン受容体の結晶構造が解明され、DELLA因子との相互作用において受容体分子N末端側のlid(フタ)と呼ばれる領域の関与が明らかとなった[5,6]。そこで、DELLA因子に対する親和性決定領域はこのlidのみで十分であるかを明確にすべく、lid領域と受容体分子内残りの領域とをスワップさせたキメラ受容体を作製して、親和性の変化状況を調べた。その結果、大半は予想どおりlid領域のみに依存して親和性の強弱が決まる傾向を認めたが、ある特定の組合せではその予想にそぐわない結果を得た。これは、lid以外の領域も親和性制御に関与することを強く示唆する。これらの知見をもとに、ジベレリンの信号伝達制御の仕組みについて概説したい。

[1] M. Ueguchi-Tanaka, M. Ashikari, M. Nakajima, H. Itoh, E. Katoh, *et al.*, *Nature* **437**: 693 (2005).

[2] M. Nakajima, A. Shimada, Y. Takashi, Y.-C. Kim, S.-H. Park, *et al.*, *Plant J.* **46**: 880 (2006).

[3] S. Iuchi, H. Suzuki, Y.-C. Kim, A. Iuchi, T. Kuromori, *et al.*, *Plant J.*, **50**: 958 (2007).

[4] H. Suzuki, S.-H. Park, K. Okubo, J. Kitamura, M. Ueguchi-Tanaka, *et al.*, *Plant J.*, **60**: 48 (2009).

[5] K. Murase, Y. Hirano, T.-P. Sun and T. Hakoshima, *Nature*, **456**: 459 (2008).

[6] A. Shimada, M. Ueguchi-Tanaka, T. Nakatsu, M. Nakajima, Y. Naoe, *et al.*, *Nature*, **456**: 520 (2008).

金属置換型イプシロン酸化鉄の合成と 高周波ミリ波領域における磁気光学効果の観測

理学系研究科・化学専攻・大越研究室

生井飛鳥、大越慎一

酸化鉄のうち、 Fe_2O_3 にはアルファ相、ベータ相、ガンマ相、イプシロン相が存在することが知られている。当研究室では、化学的手法を用いたナノ微粒子合成により、希少相であるイプシロン型-酸化鉄 ($\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$) を初めて単相として得ることに成功し、この $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ が室温で 20 kOe という巨大な保磁力(H_c)を示すことを見出した。本講演では、 $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の Fe^{3+} イオンを他種の金属イオン(M^{3+})で置換した $\epsilon\text{-M}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$ ナノ磁性体の合成、磁気特性および高周波ミリ波吸収特性について報告する[1-3]。

$\epsilon\text{-Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$ ナノ磁性体は逆ミセル法とゾルゲル法の組み合わせにより合成した。粉末X線回折パターンのリートベルト解析により、 $\epsilon\text{-Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$ の結晶構造中の4つの非等価な鉄サイト(A-Dサイト)のうち、AlイオンはDサイトを選択的に置換することが明らかになっている(図 1a)。磁気特性を測定したところ、 $\epsilon\text{-Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$ は大きな磁気ヒステリシスループを示した(図 1b)。室温における H_c の値は、非磁性イオンである Al^{3+} イオンの置換に伴って、22.5 kOe ($x=0$)から 10.2 kOe ($x=0.40$)へと大きく変化した。室温における電磁波吸収特性を測定したところ、 $\epsilon\text{-Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$ は 112 GHz ($x=0.40$) から 182 GHz ($x=0$)という幅広いミリ波領域で吸収ピークを示した。観測されたミリ波吸収は、ジャイロ磁気効果による磁化の歳差運動と電磁波の共鳴現象(ゼロ磁場強磁性共鳴)によるもので、観測された共鳴周波数(182 GHz ($x=0$))は現在まで報告されている中

で最高の値であり、大きな磁気異方性に起因している。また、 $\epsilon\text{-Al}_{0.06}\text{Fe}_{1.94}\text{O}_3$ についてミリ波吸収特性の温度依存性を調べたところ、共鳴周波数が 186 GHzまで上昇したのち、急激に減少することが観測された。これは、スピ

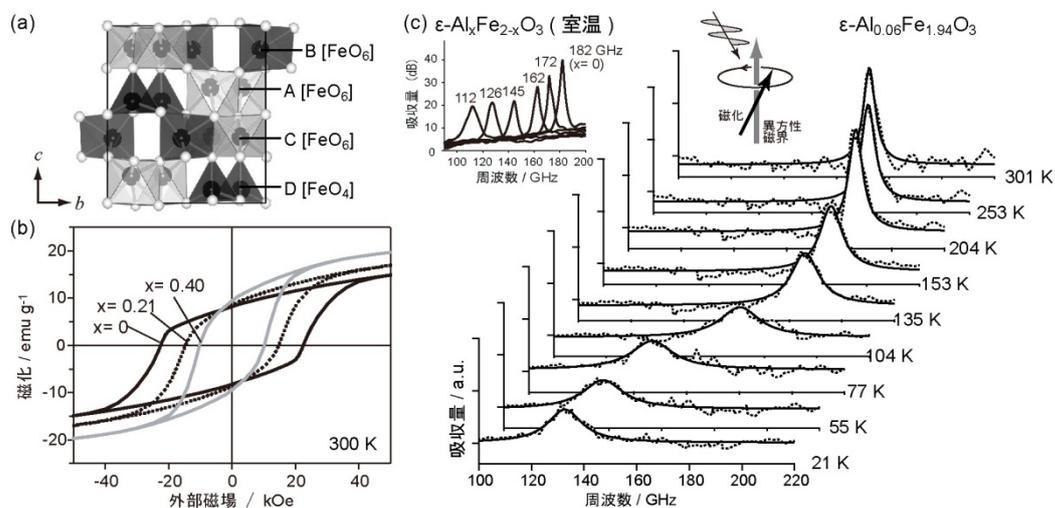


図 1. (a) 金属置換型 $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の結晶構造. (b) 室温における $\epsilon\text{-Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$ の磁気ヒステリシス曲線. (c) $\epsilon\text{-Al}_{0.06}\text{Fe}_{1.94}\text{O}_3$ のミリ波吸収スペクトルの温度依存性. 挿入図(左)は室温における $\epsilon\text{-Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$ のミリ波吸収スペクトル. 挿入図(中央)はジャイロ磁気効果による磁化と電磁場の共鳴現象の模式図.

[1] A. Namai, S. Sakurai, M. Nakajima, T. Suemoto, K. Matsumoto, M. Goto, S. Sasaki, and S. Ohkoshi, *J. Am. Chem. Soc.*, 131, 1170 (2009). [2] S. Ohkoshi, S. Kuroki, S. Sakurai, K. Matsumoto, K. Sato, S. Sasaki, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 46, 8392 (2007). [3] M. Yoshikiyo, A. Namai, M. Nakajima, T. Suemoto, and S. Ohkoshi, *J. Appl. Phys.*, in press.

O-03 ZnO 量子井戸中の残留キャリアによる内部電場遮蔽長の測定

¹東京大学工学系研究科、²東京大学理学系研究科、³理化学研究所
樋口卓也¹、吉岡孝高²、塚崎敦¹、瀬川勇三郎³、川崎雅司^{1,3}、五神真^{1,2}

輸送特性測定によっては直接的に測定することが難しい界面近傍の残留キャリアの分布の様子を、井戸幅に傾斜を持つ量子井戸を顕微的に分光する新たな手法により測定した結果について発表する。

ZnOは紫外域にバンドギャップを持つ直接遷移型の半導体であり、ドーピングした際の良好な電子輸送特性も相まって、紫外発光デバイスや透明電極などへの応用を視野に入れた新規半導体産業用材料として大変期待されている。近年の成膜技術の進歩によってその電子移動度が非常に向上しており、特に高移動度2次元電子ガス(2DEG)を形成することによって、分数量子ホール効果が観測されるに至っている。この2DEGはZnOとバリア物質($Mg_xZn_{1-x}O$)との界面近傍に自発的に形成されるという特徴を持つ。その理由として、これらの物質が反転対称性を持たないことから自発分極・圧電分極を示し、その不連続性に伴って生じる内部電場を遮蔽するために、残留キャリアとして生じる電子が界面近傍に集まるという機構が考えられている。この機構は輸送特性測定によって観測された面内の2次元キャリア密度をよく説明している。一方で深さ方向のキャリアの分布、つまり残留キャリアによる内部電界の遮蔽長に関しては実験的には輸送特性から理解することは難しい。

本研究では、 $Mg_xZn_{1-x}O/ZnO/Mg_xZn_{1-x}O$ 量子井戸の発光の井戸幅依存性を詳細に調べることによって、内部電場の遮蔽の様子を観測することを目的とした。井戸幅を連続的に変化させるためにコンビナトリアル成膜法によって一つのサンプル上で膜厚に傾斜をつけたサンプルを用い、顕微分光によって発光の厚み依存性を求めた。バルクZnO中では電子正孔間のクーロン相互作用の遮蔽が小さいために励起子が非常に安定で、高い励起子束縛エネルギー(60 meV)を持つ励起子からの発光が室温でも観測される。しかし内部電界の加わっている量子井戸内では、量子閉じ込め効果や内部電界の効果、界面局在準位の存在の影響によって線幅の拡大や発光ピークのシフトなどが観測される。これらの効果は異なる井戸幅依存性を示し、井戸幅が広い極限ではバルクに漸近するように効果が小さくなっていく。

発光測定によって井戸幅が30 nmを超えたあたりからバルク的な発光が観測され、この厚みが内部電場の遮蔽長を与える。この結果はコンビ成膜法と顕微分光の技術の組み合わせによって輸送特性からはわからなかった深さ方向の情報をうまく抽出することができた例であり、他の多くの系への応用も期待されるものである。

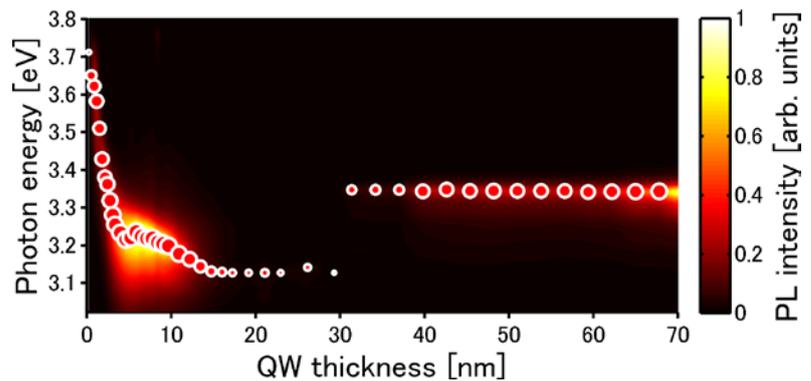


図 1. 量子井戸からの発光スペクトルの井戸幅依存性。図中の丸点の大きさは対数での発光強度、縦方向の位置はピークエネルギーをそれぞれ表している。

[1] A. Tsukazaki *et al.*, Nature Materials 9 889 (2010).

O-04 高密度励起半導体における電子・正孔系の相転移ダイナミクス

理学系研究科物理学専攻島野研究室
鈴木 剛

半導体に光を照射すると、電荷の担い手である電子と正孔が同数作られる。この電子と正孔の系は、温度・密度に応じて非常に多様な性質を示す。図1に、典型的な半導体であるシリコンの電子正孔系の相図を示す。低密度では、電子と正孔はクーロン引力により互いに結び付き、水素原子のような束縛状態、励起子を形成する。励起子は電気的に中性の粒子であるため、励起子の気体は絶縁体となる。一方、高密度になると、クーロン引力が周りの電子正孔により遮蔽されて励起子は乖離し、代わりに電子正孔プラズマと呼ばれる状態が作られる。電子正孔プラズマ中では、電子と正孔が独立に動き回れるため、導電性を示し系全体では金属となる。この密度増大に伴う絶縁体から金属への転移（あるいはクロスオーバー）を励起子モット転移と呼ぶ。その境界を理論的に決めるためには、クーロン力の遮蔽をどう取り入れるかが重要であり、古典的な遮蔽であるデバイヒュッケル型（図1点線）や多体効果を平均場として取り入れた乱雑位相近似（図1一点鎖線）などが提唱されている。しかし、励起子モット転移は本質的に電子相関によって生じる多体問題であるため、それがどのように起きるかは理論、実験ともに長年に亘る未解決の問題である。

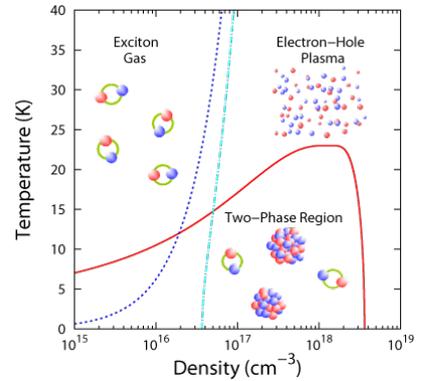


図1. Siの電子正孔系の相図

もう1つの相転移として気相・液相転移が存在する。これは、系がさらに低温になり図1の赤い実線の内側に入ると、密度の非常に高い電子正孔液滴と密度の低い励起子気体に空間的に相分離する現象である。古典粒子の気相・液相転移と類似する点が多いが、支配する力は純粋なクーロン力であり、量子多体効果により発現するという観点から非常に興味深い。

我々は電子正孔系における上記2つの相転移ダイナミクスを、テラヘルツ時間領域分光法という低エネルギー(~meV)領域の超高速時間分解分光技術を用いて観測した。図2は、低温・高密度（格子温度：5 K, 電子正孔対密度： $1.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ）における誘電率・伝導率の時間変化を表す[1]。時間とともに、電子正孔液滴の表面プラズモンに由来するブロードなピーク位置が高エネルギーシフトしていく様子（▼）が観測された。これは、電子正孔液滴内における電子正孔対密度が連続的に増加していくことを示しており、1ns以下で起きる実空間での液滴凝縮のダイナミクスを初めて捉えたものである。講演では、励起子モット転移の最新の結果にも触れ、半導体の電子正孔系の相転移現象について明らかになってきたことを紹介する。

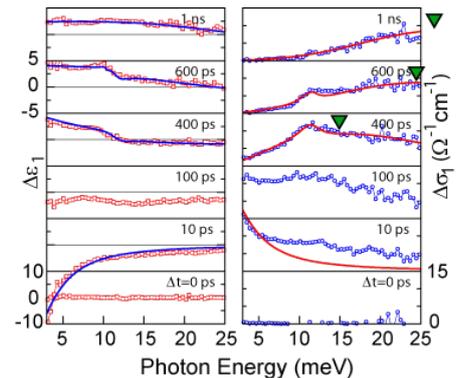


図2. 光パルス照射によってつくられた電子正孔系のテラヘルツ帯誘電率・光学伝導度の時間変化。実線はフィッティング。温度は5 K。

[1]T. Suzuki and R. Shimano, Phys. Rev. Lett. **103**, 057401 (2009)

O-05 強磁性半導体 GaMnAs 量子井戸二重障壁構造における 共鳴トンネル分光法を用いたフェルミ準位の観測

工学系研究科・電気系工学専攻・田中大矢研究室
宗田伊理也、寺田博、大矢忍、田中雅明

半導体エレクトロニクスにおいて、電子の電荷のみならず、スピン自由度を積極的に利用することで、これまで困難であった新しいデバイスの実現が期待される。こういったスピントロニクスを目指すアプローチの一つに、半導体に磁性不純物を添加した強磁性半導体が挙げられる。半導体でありながら強磁性を示す強磁性半導体の中でも最も有望視されているのがGaMnAsである。近年、GaMnAsの強磁性の発現機構が論争になっている。 p - d 交換相互作用と二重交換相互作用の二つのモデルが提唱されており、フェルミ準位(E_F)が価電子帯(VB)と不純物帯(IB)のどちらに存在するかが重要である。最近、我々のグループは、共鳴トンネル効果によって、GaMnAsの E_F がVBになく、禁制帯中にあることを報告した[1,2]。本研究においては、Mn濃度が1.6%、及び、2.3%で井戸幅が異なるGaMnAs量子井戸二重障壁構造[図1(a)]における E_F を観測したので報告する。共鳴トンネル効果によって量子準位を測定し、量子準位の井戸幅依存性、及び、ゼロバイアスが E_F であることから、 E_F のVB上端からの位置を見積もることが出来る[図1(b,c)]。図2に、実際に共鳴トンネル分光法により測定した量子準位の井戸幅依存性を示す。これにより、 E_F がVB上端から30 meV以内の禁制帯中に位置することが分かった。さらに、 E_F の位置のMn濃度依存性から、IBと強磁性の関係、及び、IBとVBの関係を明らかにすることが期待される。

[1] S. Ohya, I. Muneta, P. N. Hai, and M. Tanaka, Phys. Rev. Lett. **104**, 167204 (2010).
[2] S. Ohya, K. Takata, and M. Tanaka, Nature Physics **7**, 342 (2011).

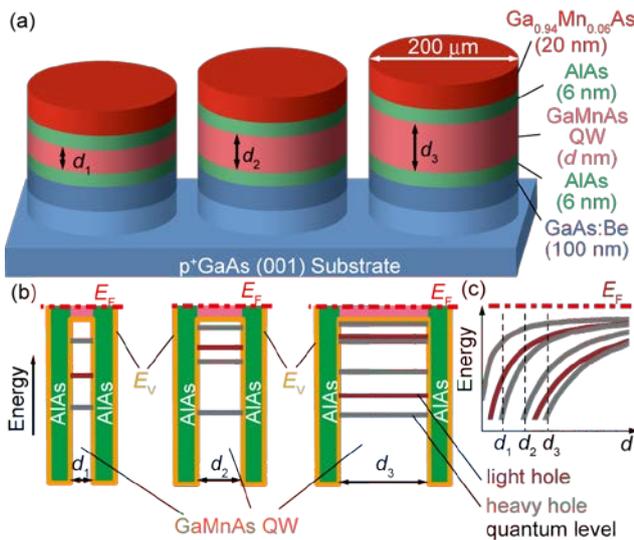


図1 (a) 井戸幅が異なる GaMnAs 量子井戸二重障壁構造の模式図。(b) 価電子帯の様子と量子準位。(c) 量子準位の井戸幅依存性。

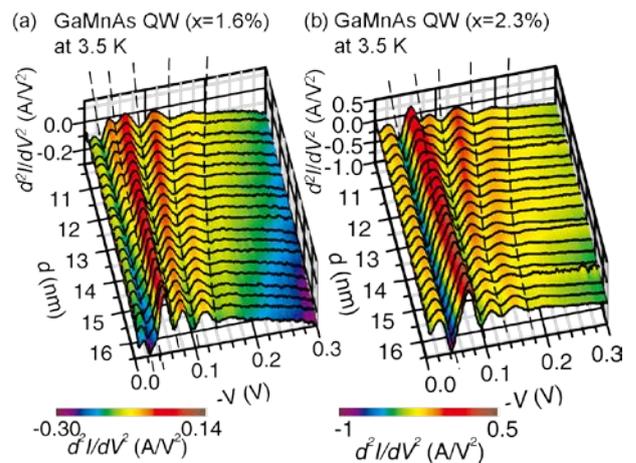


図2 負電圧において測定された量子準位の井戸幅依存性。GaMnAs 量子井戸の Mn 濃度は (a) 1.6%、(b) 2.3%。測定温度は 3.5 K。

O-06 バイオミネラリゼーションを利用した ナノスピントロニクス材料の作製とその物性に関する研究

工学系研究科 バイオエンジニアリング専攻 田畑研究室
加地弘樹

近年、加工技術の微細化トレンドが限界を迎えつつあり、従来のトップダウン型のプロセスに加えてボトムアップ型のプロセスも組み合わせて利用することが望まれている。ボトムアッププロセスの一つとして提唱されているのがバイオミネラリゼーションを利用した方法である。バイオミネラリゼーションとは生体が無機物質を作る働きのことであり、真珠やサンゴの骨格など自然界に広く見られる。この働きを利用して、あらかじめ設計したタンパク質をテンプレートにして表面に無機物質を堆積させることでナノオーダーの部品を作製する事が出来る。バイオミネラリゼーションを用いて部品を作製した例としてはかご状タンパク質であるフェリチンを利用したものや、チューブ状タンパク質であるタバコモザイクウイルス(TMV)を利用したものが報告されている。今回はバイオミネラリゼーションが行いやすいように遺伝子を改変されたトマトモザイクウイルス内部に Co/Pt を堆積させて作製した磁性体ナノワイヤ[1]の磁気・電気特性について測定したものを報告する。

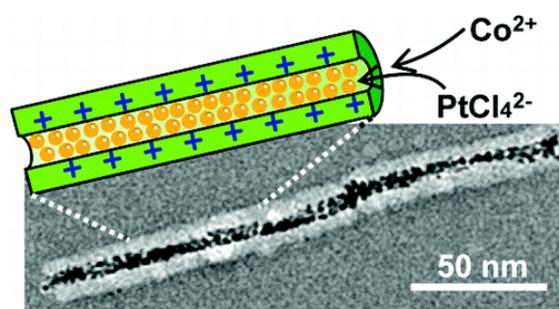


図1. ウイルス粒子内部の模式図と TEM 画像

[1] M. Kobayashi, et al., Nano Lett. **10**, p773-776(2010).

O-07 超伝導転移端センサを用いた硬 X 線・ γ 線スペクトロメータの開発

工学系研究科・バイオエンジニアリング専攻¹⁾・原子力国際専攻²⁾・高橋研究室
畠山修一¹⁾，ダマヤンティトウシャラ²⁾，大野雅史²⁾，高橋浩之¹⁾²⁾

核物質中に含まれるウラン、プルトニウムやネプツニウム等のマイナーアクチノイドを高精度に元素分析・核種同定を行う技術は、核不拡散、保障措置において必要不可欠である。核物質から放出される蛍光 X 線や γ 線の測定には従来 Ge 半導体検出器やシンチレータ等が用いられて来たが、核分裂生成物等の多元素混在下において各種元素の近接したエネルギーピークを分離するに十分なエネルギー分解能が得られないといった問題点があり、新たな検出器の開発が強く望まれている。我々が開発を行っている超伝導転移端センサ (Transition Edge Sensor : TES) 型マイクロカロリメータは極低温における超伝導体の急峻な温度抵抗変化を用いたスペクトロメータであり、既存放射線検出器とは全く異なる検出原理を有し、半導体検出器と比較してエネルギー分解能が 2 桁程向上する事が可能となる。本研究では、この超伝導転移端センサを導入し、アクチノイド元素の蛍光 X 線 K 線のエネルギーピークが集中する 100 keV 付近において近接する蛍光 X 線スペクトルピークの分離能力を飛躍的に高めるため、Ge 半導体検出器より 20 倍も優れたエネルギー分解能 30eV 以上の実現を目指す。

本研究では、これまでに我々が開発してきた超伝導イリジウム/金 (Ir/Au) 温度センサ[1]をベースに、新たに 100 keV 付近の硬 X 線・ γ 線に対して高い吸収効率が得られる鉛や錫のバルク製放射線吸収体を導入し、入射放射線のエネルギーを吸収体にて高効率に熱に変換して、Ir/Au-TES で読み出す検出素子の開発を行った。超伝導薄膜(250 μm 角)上にワイヤボンディングマシンの針を十分に尖らせた特製の治具を用いてスタイクキャスト製の極小ポストを形成して、このエポキシポスト上にフリップチップボンダを用いて吸収体を正確に位置制御しながら、超伝導薄膜上に搭載する手法を確立した。超伝導薄膜は極めて薄い窒化シリコンメンブレン(500 nm 厚)上に製膜され、エポキシポストを用いて鉛や錫の放射線吸収体が超伝導薄膜上に搭載されており、この構造により吸収体は窒化シリコンメンブレンからは熱的に浮いた構造が実現され、放射線入射により吸収体内で生じた熱を高効率にロス無く超伝導センサに伝達する事が可能となる。作製した素子を寒剤フリーパルス管希釈冷凍機のコールドステージ上に搭載し、JAEA 大洗研究開発センターの照射燃料試験施設内で約 100 mK まで冷却し、その応答特性とエネルギー分解能の評価を行った。現在、分光特性は冷凍機の機械的振動によるノイズで制限されているが、60 keV の γ 線に対して 485eV が得られ、すでに半導体検出器の限界値(~500 eV FWHM)を越える分光特性を証明しつつある(図 1 参照)。今後は冷凍機の振動抑制等によるノイズ低減を図り、エネルギー分解能の向上させ、核物質検出実証を進める予定である。

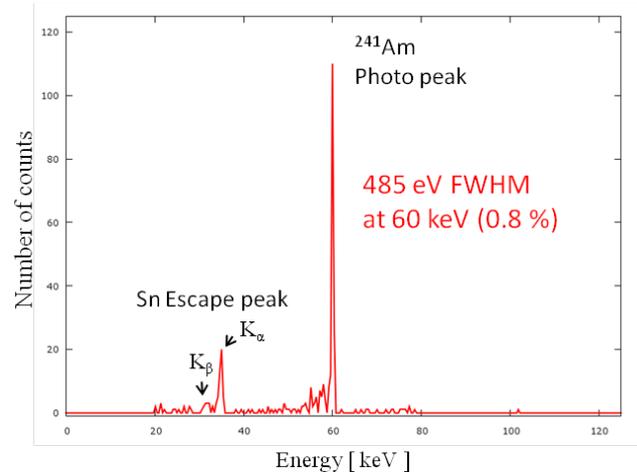


図 1. 核物質試料から取得したスペクトル

[1] Kunieda, Fukuda et al., *Nucl. Instrum. and Meth. A*, **520**, 1-3, (2004), 267-269.

O-08 面内異方的格子歪みを受けたペロブスカイトマンガン酸化物薄膜に対するルテニウム置換効果

理学系研究科化学専攻 固体化学研究室

重松 圭、近松 彰、廣瀬 靖、福村 知昭、長谷川 哲也

【緒言】 ペロブスカイトマンガン酸化物 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO) は、室温以上にキュリー点を持つハーフメタルであり、室温動作可能なスピントロニクスデバイスへの応用が期待されている。特に、 NdGaO_3 (NGO) (110) 基板上的LSMOは面内に一軸磁気異方性を有するため、平面型GMR素子の電極として有用である。しかしながら、LSMOは軟磁性体であるため、LSMO単独で保磁力差のある電極を作製することは容易でない。そこで我々は、NGO (110)基板上にMnサイトを少量Ruで置換したLSMOを堆積させることで、金属伝導性・面内一軸磁気異方性を保ったまま保磁力を増大させることに成功した[1]。

【実験】 パルスレーザー堆積法により、原子レベルで平坦なNGO (110) 基板上に膜厚約 30 nmのLSMRO ($y = 0, 0.05, 0.1$) 薄膜を作製した。製膜条件は、基板温度を 600~650°C、酸素分圧を $1.0 \times 10^{-4} \sim 5.0 \times 10^{-3}$ Torr とした。製膜後、1000~1050 °Cで大気アニールを行った。得られた薄膜の構造評価・磁化測定・電気抵抗率測定は、それぞれX線回折・超伝導量子干渉計 (SQUID) ・4端子法により行った。

【結果と考察】 図1に 100 Kで測定したNGO (110)基板上的 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{1-y}\text{Ru}_y\text{O}_3$ ($y = 0, 0.05, 0.1$)薄膜の磁気ヒステリシス曲線を示す。実線と点線は磁場の印加方向がそれぞれ $[1\bar{1}0]_{\text{NGO}}$ 、 $[001]_{\text{NGO}}$ に平行であることを示している。ヒステリシス曲線の形状に注目すると、 $[1\bar{1}0]_{\text{NGO}}$ 方向では長方形に近い形状である一方で、 $[001]_{\text{NGO}}$ 方向は横に長い形状が見て取れる。この結果は、 $y = 0 - 0.1$ のいずれの組成においても、 $[1\bar{1}0]_{\text{NGO}}$ が容易軸、 $[001]_{\text{NGO}}$ が困難軸に対応する面内一軸磁気異方性を有していることを示している。また、それぞれの保磁力に着目すると、 $y = 0$ では、容易軸の保磁力は 90 Oeであり困難軸の 100 Oeより小さい。一方、 $y = 0.05, 0.1$ ではそれぞれ容易軸が 90 Oe、250 Oe、困難軸が 65 Oe、140 Oeであり、Ruを置換するにつれて容易軸と困難軸の保磁力の大きさが逆転し保磁力比が上昇した。このことは、MnとRuの間に働く反強磁性交換相互作用がNGO (110)基板による一軸格子歪みにより増大したためと考えられる。

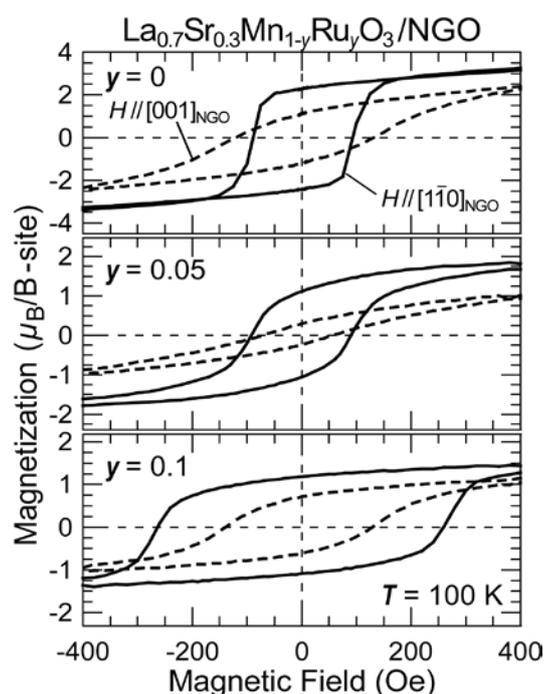


図1 : 100 Kで測定したNGO (110)基板上 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{1-y}\text{Ru}_y\text{O}_3$ ($y = 0, 0.05, 0.1$)薄膜の磁気ヒステリシス曲線。

[1] K. Shigematsu *et al.*, J. Appl. Phys., *in press*.

O-09 質量ゼロの電子がおりなす特異な磁場応答と対称性に関する 有機物結晶をもちいた核磁気共鳴研究

工学系研究科・物理工学専攻・鹿野田研究室

平田 倫啓, 谷口 智隆, 石川 恭平, 宮川 和也, 田村 雅史, 鹿野田 一司

私たちはこの研究で、固体中の電子が示す磁場に対する応答と対称性について、実験的に検証しました。特に、見かけ上質量がゼロに見える電子状態（ディラック電子といいます）に注目しています。電子は電荷をもっています。磁場をかけると、電荷の運動はローレンツ力により曲げられ、電子は周回運動を始めます。この周回の周期は、量子力学によると特定のものしか許されません（これをランダウ準位といいます）。ディラック電子の場合、質量のある通常の電子とは異なるランダウ準位を示します[1]。

私たちはまず、ディラック電子型のランダウ準位を、核磁気共鳴（NMR）により検出することを試みました。そして、有機物結晶 α -(BEDT-TTF)₂I₃中で、これにはじめて成功しました[2]。

次に、この α -(BEDT-TTF)₂I₃・ディラック電子型ランダウ準位の内包する対称性について、実験的に検証しました。異なる周回周期をもつランダウ準位は、異なるエネルギー値をもちます。これをエネルギー準位と言います。ディラック電子の場合、 $n=0, \pm 1, \pm 2 \dots$ で区別されます[1]。特に今の場合、各ランダウ準位は、電子のもつ「スピン」（小さな磁石のようなもの）の向き（上・下）の2自由度と、結晶の対称性に関連した2自由度（通常「谷」の自由度と呼ばれます）の、合わせて4自由度を内在しています。磁場が弱いか、あるいは温度が十分に高い場合、この「スピン」と「谷」の4自由度に対応した4つのエネルギー準位は、同一ランダウ準位内では同じエネルギー値をもち、等価です。しかし、低温、高磁場下では、これらが自発的に非等価になり得ると、理論的に予言されています[3]。（これは、磁場とスピンの相互作用 – ゼーマン結合 – および電子間の電氣的な相互作用 – クーロン相互作用 – にそれぞれ由来します。）

そこで私たちは、 $n=0$ のランダウ準位中に存在する、上記4つの等価準位に着目しました。そして、温度と磁場をパラメータとして変化させ、4つの等価準位が低温に向けて「スピン」、「谷」の順で非等価になっていく現象（自発的対称性の破れ）を、NMRによりはじめて検出しました。このような現象は、グラフェンという、同様にディラック電子が現れる代表的な物質でも示唆されています[4]。しかし、対称性に関する踏み込んだ議論が行えないため、実験的にはまだ未検証です。本研究はこの方面での初めての成功例であり、ディラック電子研究の進展に対し、多くの示唆的な情報を提供すると期待されます。

[1] J. W. McClure, Phys. Rev. **104**, 666 (1956).

[2] K. Bender *et al.*, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1984, **108**, 359-371; N. Tajima *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 051010 (2006), Phys. Rev. Lett. **102**, 176403 (2009); S. Katayama *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 054705 (2006).

[3] A. Kobayashi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 114711 (2009).

[4] Y. Zhang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 136806 (2006).

O-10 強磁場利用によるタンパク質結晶高品質化の試み

農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・食品工学研究室

中村 顕、大塚 淳、田之倉 優

【背景・目的】

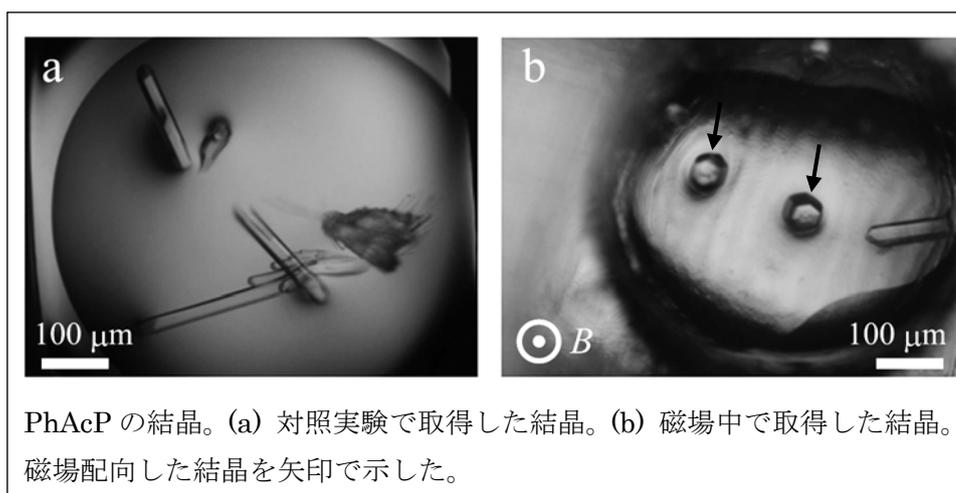
生命現象の担い手であるタンパク質の立体構造を精密に決定することは、構造と機能との相関を解明し、創薬や酵素の高機能化などに応用していくために必要不可欠である。X線結晶構造解析によってタンパク質分子の精密な構造モデルを構築するためには、高いX線回折能を有する高品質結晶を取得する必要がある。結晶品質を向上させる方法の一つとして、結晶化の過程で磁場・磁気力場を利用することが知られている。本研究では、強磁場環境下でタンパク質を結晶化させることにより、高品質な結晶を得ることを目的とした。

【装置・方法】

鉛直上向きに最大磁場 15.3 Tを発生し、磁場と磁場勾配の積($B_z dB_z/dz$)で表される磁気力場が最大-1500 T²/mとなる超伝導磁石を使用し、直径 40 mmのボア内空間をタンパク質結晶化に使用した。結晶化はシッティングドロップ蒸気拡散法を用いて 20°Cで行った。磁場中で得られた結晶は対照実験で得られた結晶との間で、形状、大きさなどの外観比較を行ったほか、X線回折実験に供して、回折分解能、結晶のモザイク性、温度因子を比較することにより、その品質を評価した。

【結果・考察】

対照実験の結果と比較して、磁場中で得られた結晶は、クラスター化の抑制、大型化の傾向が見られた。これらの特徴は宇宙空間における微小重力環境下での結晶化においても報告されている。本研究では、超伝導磁石による磁気力がタンパク質溶液に対する実効重力を低減させたことで、自然対流が抑制された結果を反映していると考えられる。また、磁場方向と平行に配向する結晶が複数観察された(右図)。これらの磁場配向を示した結晶では、配向していない結晶や対照実験で得られた結晶と比較して、X線回折分解能が向上するなど品質が改善されていた。この他、強磁場中で生成された結晶で、磁場配向を示していなくても有意に品質が向上している事例があった。以上のように、強磁場・磁気力場利用によって高品質なタンパク質結晶の取得に成功した[1]。



[1] A. Nakamura, J. Ohtsuka, K. Miyazono, *et al.*, *Cryst. Growth Des.*, in press.

O-11 2次元平面に束縛したヘリウム3は液化するか？

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻 福山研究室
佐藤 大輔、成瀬 公暁、松井 朋裕、福山 寛

ヘリウム3 (^3He) は常圧下では $T=3.2\text{ K}$ という極低温で液化し、絶対零度でも固化せず液体に止まる。これは、不確定性原理からくる大きな零点振動が、固化しようとするHe原子間のファン・デル・ワールス引力に打ち勝つからである。一方、 ^3He が固体表面に吸着して2次元平面に束縛された場合はどうだろうか？2次元系では、零点振動やフェルミ統計性による斥力が3次元系よりさらに重要になることが知られている。過去のほとんどの理論計算は、 ^3He の2次元系は液化せず、絶対零度でも気体状態に留まると予言している。つまり、基底状態で唯一の量子気体と考えられてきた。

ところが最近、我々は、原子レベルで平坦なグラファイト基板上に ^3He の単原子膜を吸着させ、2 mKの超低温度までその熱容量を測定したところ、この系が 1 nm^2 あたり 0.6 原子というこれまで発見されてきた中でも最も希薄な液滴を形成することを発見した[1,2]。図1は、粒子面密度 (ρ) が 1.7 nm^{-2} 以下の吸着第2層 ^3He の熱容量 (C) の測定結果である。フェルミ統計にしたがう粒子の縮退温度域での特徴である温度に比例した熱容量 ($C = \gamma T$) が観測されている。2次元系の場合、その比例係数 γ は基板上で粒子が占める面積 A と粒子の有効質量 (m^*) に比例するので、低密度の極限では $m^* \rightarrow m$ (^3He 原子質量) となって、 γ は一定値 (γ_0 : 図1と2の破線) に近づくはずである。ところが、図2に示すように、 0.6 nm^{-2} 以下になると、 γ はゼロに向かって直線的に減少することが分かった。これは、 ^3He が自己凝縮して基板の一部に希薄液滴 ($\rho=0.6\text{ nm}^{-2}$) として偏在している証拠である(図2挿入図)。それだけでなく、吸着第1層と第3層でも同様の自己凝縮相が存在することが判明した。すなわち、この現象は ^3He の2次元系の本質的な性質であり、フェルミ多体系に対する従来の理論計算に再考を強く迫るものである。

[1] D. Sato *et al.*, J. Low Temp. Phys. **158**, 201 (2010).

[2] D. Sato *et al.*, to appear.

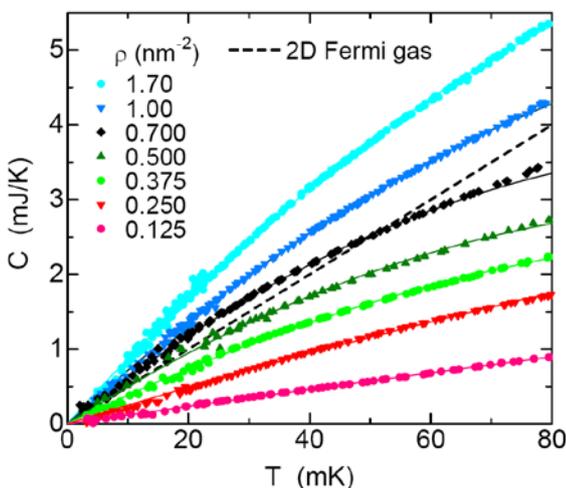


図1. グラファイト上吸着第2層ヘリウム3の熱容量。

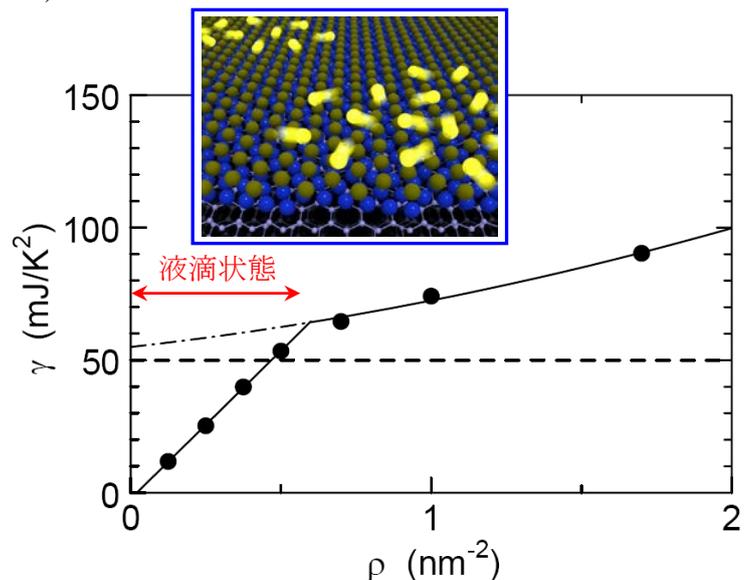


図2. 熱容量の温度係数 γ の密度依存性と2次元液滴のイメージ図(内挿図)。

O-12 厚いブロック層を有する層状鉄ニクタイトの 化学組成と超伝導特性

大学院工学系研究科・応用化学専攻・岸尾研究室
荻野拓・町田健次・清水保章・岸尾光二・下山淳一

【緒言】 東工大の細野グループによって発見された鉄系超伝導体^[1]はFeの正方格子を共通の構造ユニットとして持ち、アニオン及びブロック層の構造により様々な系が存在する。我々はペロブスカイト類縁のブロック層を持つ鉄ニクタイトに着目し、新物質探索を行ってきた。特にBサイトカチオンを混合することで $(\text{Fe}_2\text{As}_2)(\text{Ca}_{n+1}(\text{Mg},\text{Ti})_n\text{O}_y)$ [$n = 3, 4$]、 $(\text{Fe}_2\text{As}_2)(\text{Ca}_{n+2}(\text{Mg},\text{Ti})_n\text{O}_y)$ [$n = 5, 6$]、 $(\text{Fe}_2\text{As}_2)(\text{Ca}_{n+1}(\text{Sc},\text{Ti})_n\text{O}_y)$ [$n = 3, 4, 5$]、 $(\text{Fe}_2\text{As}_2)(\text{Ca}_{n+2}(\text{Al},\text{Ti})_n\text{O}_y)$ [$n = 2, 3, 4$]^[2]など一連の化合物が合成可能であることを見出している。これらの化合物は図 1 に示すように非常に厚いブロック層を有していることが特徴で、いずれも 30~47 Kでバルクの超伝導転移を示したが、鉄ニクタイト層の局所構造やキャリアドープ状態などの詳細が分かっていない。そこでこれらの化合物の結晶構造の評価及び出発組成の違い、アニールによる特性の変化を評価したので報告する。

【実験】 原料を不活性雰囲気中で秤量・混合・ペレット成型した後、真空封管した石英管中で焼成を行うことで試料を作製した。得られた試料の粉末 X 線回折パターンから相の同定と格子定数の決定を行い、SQUID 磁束計を用いて磁化率の温度依存性を、交流四端子法により抵抗率の温度依存性を測定した。

【結果と考察】 比較的単相試料が得やすい $(\text{Fe}_2\text{As}_2)(\text{Ca}_5(\text{Sc},\text{Ti})_4\text{O}_y)$ ($T_c \sim 41$ K)について Rietveld法で構造解析を行ったところ、Fe面からのAs原子の高さ(h_{an})は 1.415 Åとなった。このことから厚いペロブスカイト類縁ブロック層を持つ鉄系超伝導体においても、 h_{an} と T_c との関係は他の鉄系超伝導体で報告されているものとはほぼ一致することが分かった。一方で、 $(\text{Fe}_2\text{As}_2)(\text{Ca}_5(\text{Sc},\text{Ti})_4\text{O}_y)$ の出発 Sc/Ti比を変えて合成を試みたが有意な格子定数の変化は見られなかった。次に $(\text{Fe}_2\text{As}_2)(\text{Ca}_6(\text{Al}_{1-x}\text{Ti}_x)_4\text{O}_y)$ を出発組成 $(\text{Fe}_2\text{As}_2)(\text{Ca}_6(\text{Al}_{1-x}\text{Ti}_x)_4\text{O}_{11})$ ($0.5 < x < 0.9$)として合成を試みたところ、 x に伴う格子定数の変化が見られ、 $(\text{Fe}_2\text{As}_2)(\text{Ca}_6(\text{Al}_{1-x}\text{Ti}_x)_4\text{O}_y)$ の Al/Ti混合比には固溶域が存在することが示唆された。 x に伴う T_c^{onset} の変化が見られ、 T_c^{onset} は $x = 0.50$ 試料において最高の 38 Kに達した一方で、 $x = 0.75$ においては $T_c^{\text{onset}} = 29$ Kに低下した。また $(\text{Fe}_2\text{As}_2)(\text{Ca}_5(\text{Sc},\text{Ti})_4\text{O}_y) \cdot (\text{Fe}_2\text{As}_2)(\text{Ca}_6(\text{Al},\text{Ti})_4\text{O}_y)$ のいずれの化合物も酸素アニールを行ったところ顕著な格子定数の変化が見られた。アニール条件が限られることから系統的な物性の制御には成功していないが、これらの化合物には酸素欠損が存在する可能性が高いと考えている。

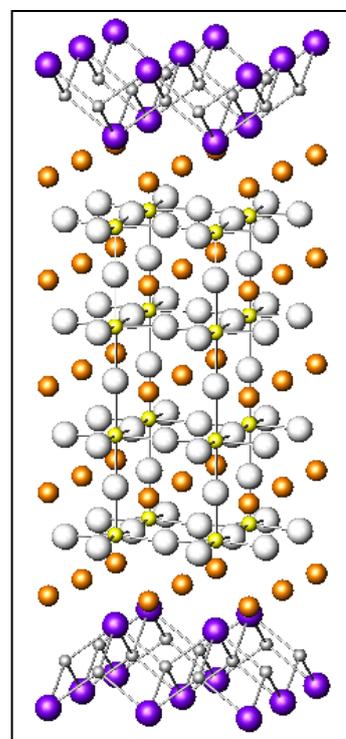


図 1. $(\text{Fe}_2\text{As}_2)(\text{Ca}_5(\text{Sc},\text{Ti})_4\text{O}_{11})$ の
結晶構造

[1] Y. Kamihara *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, **130** (2008) 3296.

[2] H. Ogino *et al.*, *SuST*, **24** (2011) 085020.

O-13

MgZnO/ZnO ヘテロ界面における
高移動度二次元電子ガスの量子ホール状態

工学系研究科・附属量子相エレクトロニクス研究センター・川崎研究室

小塚 裕介, ジョセフ フォルソン, デニス マリエンコ, 塚崎 敦, 川崎 雅司

半導体二次元界面において高移動度電子に強磁場を印加すると、ホール伝導度が量子抵抗の整数倍および簡単な分数倍で量子化される量子ホール効果が発現し、粒子の統計性を顕著に反映するため盛んに研究されてきた[1]。その研究の多くは非常に高電子移動度を示す GaAs を用いているが、グラフェンなどの台頭もあり、新しい二次元電子系における量子ホール効果の研究が盛んになりつつある。本研究では我々の研究室で培ってきた高品質 ZnO 薄膜作製技術を用いて MgZnO/ZnO 界面を作製し、その界面に形成される高移動度二次元電子の量子ホール状態観測を目的とした[2]。特に、ZnO は有効質量が大きく電子間相互作用が強いため、量子ホール状態における相関の影響に注目した。

試料はZn極性ZnO単結晶基板を用いてZnOバッファー層およびMgZnO層を分子線エピタキシーにより成膜した[3]。測定のため試料はフォトリソグラフィによるレジストのパターニングとイオンミリングを用いてホールバー形状にエッチングし、その後オーミック電極としてAl/Ti金属を蒸着した。希釈冷凍機及び³He冷凍機によって試料を冷却し、測定はロックインアンプによる低電流測定を行った。今回の測定ではキャリア濃度および移動度がそれぞれ $2.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ および $300,000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ の試料を用いた。

試料に強磁場を印加すると 0.3 T の低磁場から整数量子ホール効果、続いて 5 T 以上の高磁場で分数量子ホール効果を観測し、試料が高品質であることを示している[4]。電子相関の効果を観測するためスピン感受率を測定するとバルクの4倍ほどに増大する結果を得た。有効質量はそれほど増大していないため、 g 因子が大きくなり、量子ホール強磁性状態に近づいていることを示唆している[5]。以上の結果は ZnO の二次元電子系が相関の強い量子ホール系をなしていることを示しており、今後分数量子ホール状態における新現象観測などの期待が持たれる。

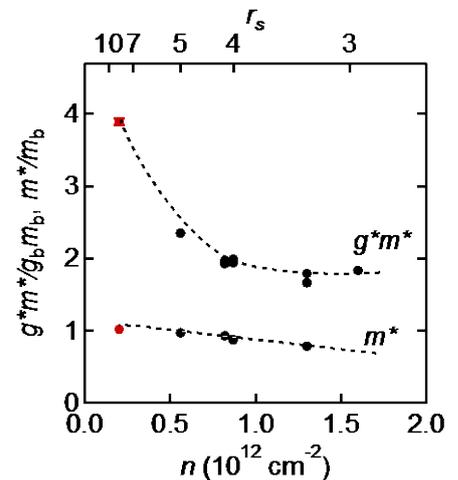


図1. バルク値に対するスピン感受率(g^*m^*)および有効質量(m^*)のキャリア濃度依存性[5]。

[1] Z. F. Ezawa, *Quantum Hall Effects: Field Theoretical Approach and Related Topics* (World Scientific, New Jersey, 2008), 2nd ed.

[2] A. Tsukazaki *et al.*, *Nature Mater.* **9**, 889 (2010).

[3] J. Falson *et al.*, *Appl. Phys. Express* **4**, 091101 (2011).

[4] Y. Kozuka *et al.*, *Phys. Rev. B* **84**, 033304 (2011).

[5] A. Tsukazaki *et al.*, *Phys. Rev. B* **78**, 233308 (2008); Y. Kozuka *et al.*, *Phys. Rev. B* **85**, 075302 (2012).

O-14

ペンタセン有機薄膜トランジスタにおける
ゲート絶縁体界面トラップの研究

所属 1) NTT 物性科学基礎研究所、2) 東京大学工学系研究科

氏名 林 稔晶¹⁾、関谷 毅²⁾、村木 康二¹⁾、染谷 隆夫²⁾

有機薄膜トランジスタは印刷技術を用いて容易に大面積化することが可能であり、かつ柔軟で伸張性に富むという特徴を有するために工学応用が期待されている。そこで本研究ではゲート絶縁体界面トラップに関する情報を得るためにペンタセン有機薄膜トランジスタのアドミッタンス測定を行った。

図1に実験に用いた有機薄膜トランジスタの構造を示す。酸化アルミニウム(膜厚 5 nm)と *n*-tetradecylphosphonic acid の単一分子膜(膜厚 2.1 nm)の二重膜をゲート絶縁層として用いた[1]。ペンタセン薄膜(膜厚 50 nm、面積 0.5 mm x 0.5 mm)とその上のソース・ドレイン電極はシャドーマスクを用いて真空蒸着した。最後に保護膜としてパリレンでコーティングした。

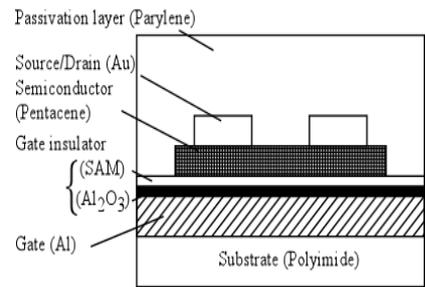


図 1. 有機半導体のデバイス構造

まず始めにこのデバイスの線形領域($V_{sd} = -0.2$ V)における伝導特性を測定した(図 2a)。ドレイン電流 $-I_d$ はゲート電圧 V_g が -1.2 V付近から指数関数的に増大し、 -2.0 V以下ではゲート電圧に対してほぼ線形に増加するという典型的なFET特性を示すことがわかった。次にキャパシタンスブリッジを用いてソース・ゲート間のアドミッタンス測定を行った。図 2bは周波数で規格化したコンダクタンス成分 G/ω を周波数の関数としてプロットしたグラフである。一般にSi MOSキャパシタのアドミッタンス測定から、 G/ω のピーク値はSi/SiO₂ 界面のトラップ準位の状態密度に比例し、またピーク位置はキャリア濃度に比例することが知られている[2]。それと同様に図 2bに見られる G/ω のピークはペンタセン/単一分子膜界面のトラップ準位に関連すると推察される。伝導特性や G/ω の温度依存性などの詳細は発表にて議論する。

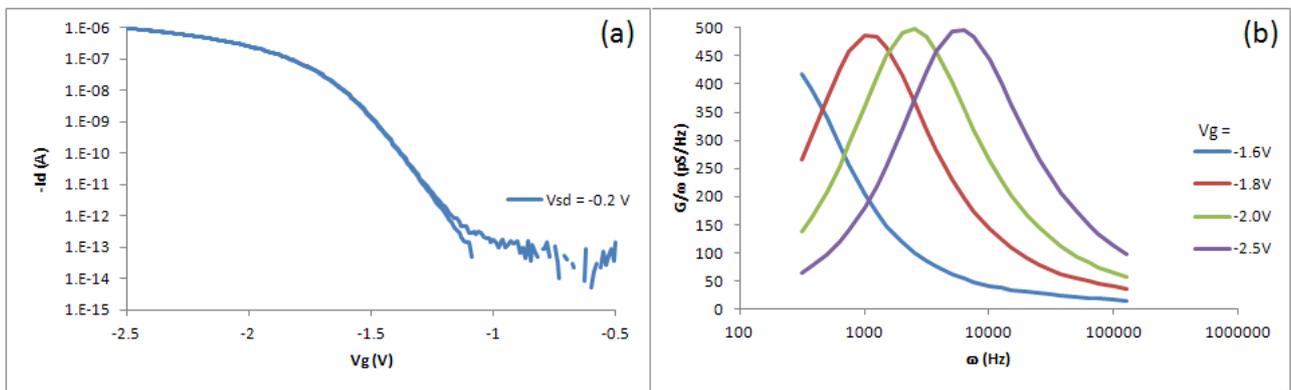


図 2. (a) 有機薄膜トランジスタの伝導特性。(b)コンダクタンス成分 G/ω の周波数依存性。

[1] H. Klauk, U. Zschieschang, J. Pflaum and M. Halik, Nature **445**, 745 (2007).

[2] E. H. Nicollian and A. Goetzberger, Appl. Phys. Lett. **7**, 216 (1965).

低温センター

戸田 亮、藤井 武則、朝光 敦

低温センターでは、学内における低温環境を利用した研究を支援することを目的として、共同利用研究室、共同利用装置の利用を提供している[1, 2, 3]。

共同利用研究室は、液体ヘリウム回収設備を持たない建物に実験室を持つが液体ヘリウムを利用する研究者、低温寒剤を多量に用いた研究を行っている研究者を対象として、低温センター内の実験室を貸し出すサービスである。年度末に翌年度の使用申請を受け付けており、利用の可否は毎年度、運営委員会の議を経て決定される。利用料金は2000円/月/m²である。本年度は、8つの研究室に対し、のべ271m²の利用を提供した。

共同利用装置は、低温環境を利用した物性測定装置であるMPMSおよびPPMS(Quantum Design社)の装置利用を提供するサービスである。使用申請は随時受け付けおり、実際の使用日は、使用許可後にメールで予約することになっている。MPMSは試料の磁化を2K-400Kの範囲で測定できる装置で、本年度は、これまでのところ12の研究課題に対し利用を提供している。利用率は約7割(平日換算)である。PPMSは0.5K-400Kの範囲で試料の電気抵抗、ホール効果、比熱などを測定できる装置で、本年度は、これまでのところ9の研究課題に利用を提供し、利用率は約2割となっている。これらの装置は、センターの研究開発部門でも使用しており、共同利用とあわせた利用率はともに9割以上となっている。

これらの装置は、2Kあるいは0.5Kまでの測定しか行えないが、現在、30mK程度までの冷却が可能な希釈冷凍機(研究開発部門所有)の整備を行っている。まだ測定系は未整備であるが、従来装置の測定可能範囲より低温の測定要望があれば、共同利用(依頼測定)もしくは低温センターとの共同研究として測定系の開発を行い、対応していく予定である。

本年度は、センター3階に両共同利用システム利用者向けの「共同利用談話室・セミナー室」を整備した。食事、休憩、グループミーティング等に利用いただける。セミナー室には今年度中に固定プロジェクターも設置する予定なので、ぜひご活用いただきたい。

-
- [1] 東京大学低温センター学内共同利用研究室使用内規
 - [2] 東京大学低温センター学内共同利用装置使用内規
 - [3] 東京大学低温センター利用の手引(共同利用部門編)

Poster Presentation

P-01 高温焼結ex-situ法によるMgB₂超伝導バルク体の作製と臨界電流特性

東京大学大学院 工学系研究科 応用化学専攻 岸尾研究室

田中裕也, 山本明保, 伊藤明植, 廣田哲也, 下山淳一, 荻野拓, 岸尾光二

二ホウ化マグネシウム(MgB₂)は金属系超伝導体として最高の超伝導転移温度($T_c = 40$ K)をもち[1]、電磁的異方性が低く、軽量、原料が比較的安価など応用面でメリットがあることから、冷凍機冷却による20 K付近で運転する医療用MRIなどへの実用化が期待されている。一方で、超伝導体中を無損失で通電可能な電流密度(臨界電流密度 J_c)が現状では低く、 J_c のさらなる改善がMgB₂の課題である。MgB₂多結晶材料の合成方法として、MgとBを熱処理することでMgB₂を得るin-situ法が広く用いられているが、in-situ法では熱処理時に生じる空孔に由来して焼結密度が原理的に低く、 J_c の抑制因子となっていることが近年の研究から明らかになっている[2]。既製のMgB₂粉末を金属容器に充填・加工後熱処理を行うex-situ法では、高い J_c のカギとなる高密度かつ均一な微細組織が期待できるが、粒間の結合が弱いことに起因して高い J_c は得られていなかった。そこで本研究では、ex-situ法MgB₂多結晶体の結晶粒間の結合を強めることを目的とし、MgB₂の自己焼結反応に着目して系統的に熱処理条件を変化させて作製した試料の微細組織および超伝導特性を調べた。

Ex-situ法MgB₂バルク試料は、高純度の自製MgB₂粉末をステンレス管に密封、一軸プレスした後、真空封入した石英管中で600-1000°C、3-240 h熱処理することで作製した。得られた試料について電子顕微鏡による微細組織観察、SQUID磁束計による磁化測定を行った。

予察的な検討から900°C程度の高温で熱処理することでMgB₂の自己焼結反応が生じることを見出した。結晶粒間の結合をさらに強めるため、900°Cで様々な時間熱処理して作製した試料の断面研磨面の二次電子像を図1に示す。熱処理時間の増加にともない結晶粒間の接触面積が増大するとともに高密度化しており、高温・長時間の熱処理によって自己焼結が進んだことがわかる。図2に J_c の磁場依存性を示すが、長時間熱処理による粒間結合の強化にともない、低磁場下における J_c は系統的に向上した。ホットプレス熱処理により高密度化した試料において J_c はさらに改善し、 5.0×10^5 A/cm²(20 K, 0 T)に達し、従来in-situ法で報告されている値を上回った。以上の結果は高温焼結法が高密度かつ均一な組織を有するex-situ法MgB₂のポテンシャルを引き出すうえで有効であることを示す。

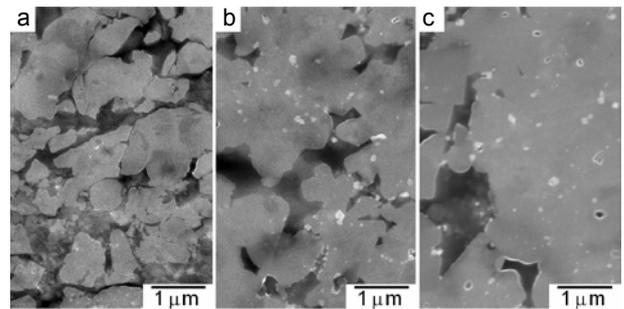


図1. 熱処理条件の異なる ex-situ 法 MgB₂ バルク断面の二次電子像。(a) 熱処理前, (b) 900°C, 24 h 熱処理, (c) 900°C, 240 h 熱処理。

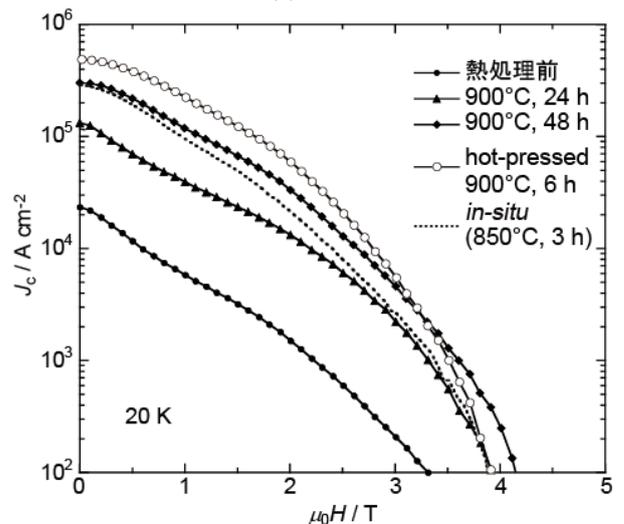


図2. 高温焼結 ex-situ 法 MgB₂ バルクの 20 K における J_c の磁場依存性。比較のため熱処理前および in-situ 法試料の特性も示した。

[1] Nagamatsu et al., Nature 419 (2001) 63.

[2] Yamamoto et al., Supercond. Sci. Technol. 20 (2007) 658.

工学系研究科電気系工学専攻

レドゥックアイン、ファムナムハイ、佐々木大輔、田中雅明

キャリア誘起強磁性半導体は、ゲート電圧や光照射による強磁性の制御をはじめ他の材料系で得られないユニークな特色を持ち、半導体スピントロニクス研究における中心的な材料である。しかし、これまで最も研究されてきた Mn 系キャリア誘起強磁性半導体 (In, Mn)As や (Ga, Mn)As では Mn が局在スピンとアクセプタの役割を同時に果たすので、常に p-型である。実用の電子デバイスを作製するには p 型と n 型両方が要求されるため、この事実がシビアな支障となっている。本研究では、低温 MBE より Fe を 9% までドーピングした単結晶 Zinc Blende 構造の (In, Fe)As の作製に成功した。(In, Fe)As では Fe 原子が In サイトを置換しており、3 価として化学結合に寄与するため、ドナやアクセプタとならず中性状態であることが電気伝導測定で確認された。これによって局在スピン濃度と独立にキャリア濃度を制御することが可能になり、これまでに存在しない n 型強磁性半導体の作製や、強磁性発現機構の研究など、応用面から理論面まで大変有用な物質として期待される。

低温 MBE 成長中に Be を添加するとダブルドナとなり、電子が (In, Fe)As に供給される。図 1 に電子濃度を増した時の (In_{0.92}, Fe_{0.08})As (100 nm) 薄膜の反射磁気円二色性 (MCD) スペクトルを示す。電子濃度を増すと (a) → (d)、InAs の光学遷移特異点において MCD 強度が大幅に増大し、(In, Fe)As の

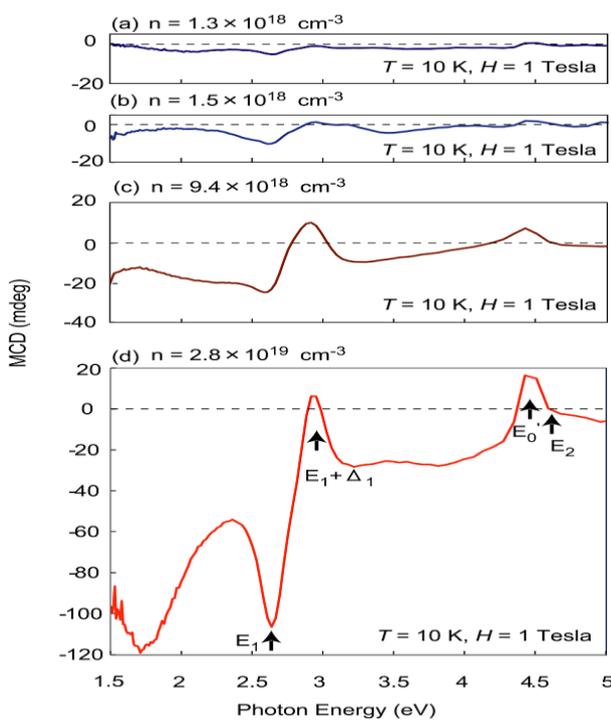


図 1. 電子濃度が異なる (In_{0.92}, Fe_{0.08})As (100 nm) 薄膜の反射磁気円二色性 (MCD) スペクトル。

バンドスピン分裂が起こる。異常ホール効果 (AHE)、超伝導量子干渉計 (SQUID) と MCD より測定された磁化特性が完全に一致することによって (In, Fe)As が真性強磁性半導体であることが確認でき、その強磁性はキャリア (電子) によって誘起される。さらに磁気光学イメージング測定より試料のマクロ的な磁気ドメインが観測され、(In, Fe)As ではマクロ的な強磁性秩序があることがわかった。一方、ホール効果と熱電効果の測定結果はキャリアが不純物バンドでなく有効質量が軽い伝導帯に存在することを示唆し、物性やバンド構造の理解が容易になる。また、薄い (In, Fe)As における AMR 測定では、[-110] 結晶軸に対する 2 回対称と 8 回対称の磁化容易軸を示している。詳細については当日報告する。磁気光学イメージング測定において、物理工学専攻の為ヶ井強先生とシムムハン博士のご協力をいただいたことに感謝申し上げます。

[1] P.N. Hai, L. D. Anh and M. Tanaka, cond-mat, arXiv:1106.0561v1 (2011).

P-03 IV 族強磁性半導体 GeFe における異常ホール効果と キャリア誘起強磁性の検証

工学系研究科 電気系工学専攻 田中・大矢研究室
伴 芳祐, 田中 雅明

強磁性半導体は、半導体に数%~十数%の磁性不純物原子を添加した混晶の材料であり低温で強磁性を示す。電子やホールが持つスピンを積極的に活用し、新しいエレクトロニクス of 創生を目指すスピネレクトロニクスの分野で近年盛んに研究が行われている。強磁性の起源はホールが仲立ちするキャリア誘起強磁性と考えられており、ホールの濃度を操作することで磁性を変化させることができる特異な性質がある。

われわれの研究室では、IV 族ベース強磁性半導体の創生を試み単結晶の GeFe の作製に先行研究にて成功した。この GeFe は磁気円二色性(MCD)により、バンドのスピンスプリットの評価が行なわれ、単相の強磁性であることが明瞭に確認されている。GeFe は材料の特性の研究が必要とされる段階であり、特にスピン依存伝導に関する研究が必要と考えている。強磁性半導体 GeFe の磁性およびスピン依存伝導特性を明らかにすることを目的として研究を行っている。

試料は、低温分子線エピタキシー(LT-MBE)法により作製した。GeFe を SOI(Silicon on Insulator)基板上に基板温度 TS=200°C で基板にエピタキシャル成長している。SOI 基板を用いる理由として、異常ホール効果を測定する際に基板の平行コンダクションを防ぐ目的がある。

製膜した GeFe は 200 μm ×50 μm の Hallbar 形状に加工して Hall 測定を行なった。低温で高磁場において測定をするために、超伝導マグネットクライオスタット(Oxford instruments, Spectromag 4000)を用いて -5T~5T の比較的高磁場の下で Hall 測定を行った。強磁性体の Hall 効果では、磁場の大きさに比例する正常 Hall 効果と、物質の磁化の大きさに比例する異常 Hall 効果が重なった結果が得られる。強い磁場は、GeFe の磁化を飽和させ、これらを分離するために用いている。

図.1 に Ge_{0.895}Fe_{0.105}:Boron(100nm) on SOI sub. の Hall 測定の結果を示す。高磁場において直線の磁場依存性が得られ、正常 Hall 効果、異常 Hall 効果を分離できることが分かる。分離した異常ホール成分から、異常 Hall 伝導率 σ_{AHE} が得られる。これを伝導率に対してプロットし、 $\sigma_{\text{AHE}} \propto \sigma^{\alpha}$ の α 値を求める事で異常 Hall 効果の起源の散乱機構の解析を行える。現在までに得られている結果は、Ge_{0.895}Fe_{0.105} の試料で $\alpha=2.1$ 、Ge_{0.86}Fe_{0.14} と Ge_{0.895}Fe_{0.105}:Boron の試料で $\alpha=1.1$ という結果となっている。 $\alpha=1$ の場合、異常ホール効果の散乱の起源は Skew scattering となるため、この結果から Ge_{0.86}Fe_{0.14}, Ge_{0.895}Fe_{0.105}:Boron の伝導の散乱機構として Skew scattering が示唆される。この異常ホール効果を用いて GeFe の伝導特性の調査やキャリア誘起強磁性の検証を行いたい。

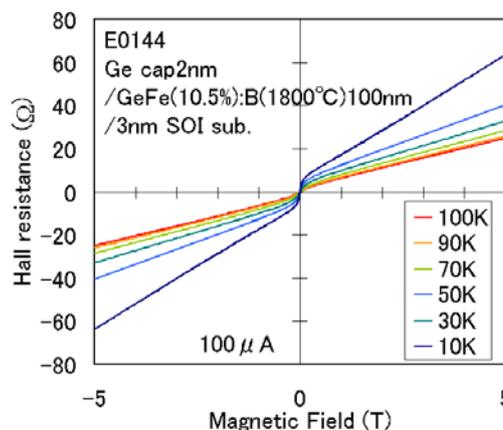


図 1 . Ge_{0.895}Fe_{0.105}:Boron(100nm) on SOI sub. の Hall 測定の結果

[1] Y. Shuto, M. Tanaka, and S. Sugahara, Appl. Phys. Lett. **90**, 132512. (2007)

P-04 磁性体電極を持つ半導体デバイスの磁気伝導特性

大学院工学系研究科・電気系工学専攻・田中大矢研究室

佐藤彰一、中根了昌、田中雅明

シリコンやガリウム砒素などの半導体におけるスピン依存電子伝導効果は、その物理的な興味と共に新規半導体電子デバイス創製へのポテンシャルの高さから、近年盛んに研究が行われている。通常、半導体は非磁性体であるため、フェルミレベルにおいてアップ/ダウンスピンバンドの状態密度に偏りのある強磁性体などの材料を用いて、1) 半導体へのスピン偏極電子流の注入、2) スピン依存伝導効果の電圧による検出、をその基本としておこなう。1と2の両方に関して、強磁性体として金属を用いた場合には2つの材料の導電率が3桁以上異なることによって、半導体中へ注入された電子のスピン偏極率とスピン蓄積効果による検出電圧が小さくなる問題（導電率ミスマッチの問題）が指摘されている。これを改善する目的で半導体と強磁性金属との間に絶縁膜を挟む構造などが提案されている。さらに2に関しては、その測定方法も研究の対象となっている。近年では「純粋なスピン流」を用いた「非局所測定」と呼ばれる測定方法が良く用いられている。図1に簡略化したデバイス構造と非局所測定法について示す。多くの研究ではこのような図を用いてデバイス構造と測定法を示しており、各電極に接続するコンタクトパッドの接続方法や形状といった条件が測定信号にどのような影響を与えるかについて議論をしていない。本研究では様々なデバイス形状を比較することによって、多端子半導体スピンデバイスにおける純粋なスピン流の創出とデバイス形状が非局所測定に与える影響に関して調べた。

本研究で用いたデバイス構造の一例を図2に示す。強磁性電極と半導体チャンネルとしてFeとSiを用い、コンタクトパッドの形状を変化させたデバイス構造を多数作製した。磁気伝導測定は面内長軸方向に掃引磁場を印加中、例えば図2においてC（グラウンド）とDに定電流を印加してAとBの電位を測定することにより、5K-室温の温度領域で磁気伝導特性の評価をおこなった。非局所信号はB-Aにより算出をおこなった。はじめに2つのFe電極の異方性磁気抵抗効果（AMR）を室温で測定したところ、電極の幅に依存して磁化反転の起きる磁場（保磁力）が異なっており（図3(a)、このことは純粋なスピン流の創出によってスピン依存信号が発現した場合は、平行/反平行磁化の変化時に電圧が急峻に変化する角型な非局所信号が検出されることを示唆している。次に室温においてC-Dに1mAの定電流を印加してB-Aの非局所信号を算出した（図3(b)）。予想に反して角型の非局所信号ではなく、2つのFe電極のAMRを重畳した形状となった。電流依存性、温度依存性、面に垂直方向への磁場の印加による測定、などによって、図3(b)の信号はSiにおけるスピン依存伝導効果ではなく、デバイス形状に起因したFe電極のAMR信号であると結論した。

発表では様々なデバイス構造における測定結果と電磁気学を用いた計算結果とを比較することにより、非局所信号を取得するための最適なデバイス構造、デバイスにおけるポテンシャルと電気力線の分布、非局所測定における純粋なスピン流の創出が原理上可能であるか、などについて議論をおこなう。

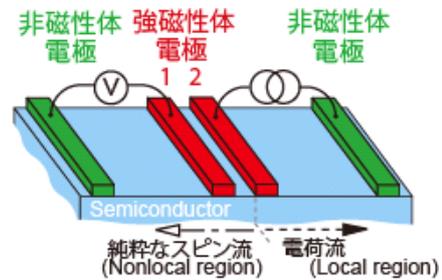


図1: 4端子スピンデバイスの構造と非局所測定法。電圧を印加していない電極間に純粋なスピン流が創出される。

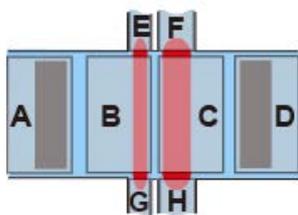


図2: 作製したデバイス形状の一例（上面図）。赤色はFe電極（左: FM1、右: FM2）、青色はSiチャンネル、A-Hの灰色はAlパッドを示している。

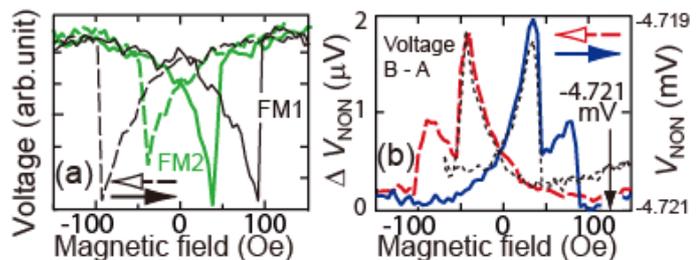


図3: (a)E-G (F-H)に一定電流を印加して室温で測定したFM1とFM2の異方性磁気抵抗効果。矢印は磁場の掃引方向を示す。(b)C-Dに1mAを印加してAとBにおける電圧値の差分から算出した非局所信号。点線はマイナーループ。

P-05 中性 - イオン性転移物質 TTF-CA の圧力下スピン状態

工学系研究科物理工学専攻鹿野田研究室修士 2 年

西川哲郎

擬一次元有機錯体TTF-CAは中性 - イオン性転移 (NI転移) を示す典型物質であり, 今までに様々な実験から図 1 の相図が提案されている[1]. 中性相 (N) は分子が閉殻構造をとるため非磁性絶縁体である. イオン性相は電荷の移動により分子上にスピンの存在が期待される. しかし, これまでは強い一次元性のため, イオン性状態になると同時にスピンパイエルズ転移が起こり, 非磁性になると考えられていた. 事実, I_D 相は非磁性であり格子の二量体化が起きている.

そして近年, 二量体を組まないイオン性相 (I_{ND}) が高压領域に存在することが $^{35}\text{Cl-NQR}$ 実験から指摘された. I_{ND} ではスピン自由度が残っているはずである. そこで本研究の目的はNI転移におけるスピン状態を解明することである. この目的のためにNMRは非常に有効な手段であり, 本発表ではTTF分子上の ^1H をプローブとしたNMRの結果を報告する.

室温におけるスピン - 格子緩和率 T_1^{-1} は, 常圧から約 0.9 GPaの間に 3 桁程度の指数関数的増大が見られた. I_{ND} 相が現れる高压下でも実験をした結果, T_1^{-1} は圧力に対して増大するものの, 低压側の指数関数的増大に比べて緩やかであった.

また, 加圧下 I_D 相において T_1^{-1} は約 0.1 eVの活性化エネルギーを持った温度依存性を示した. これはスピンソリトンの励起エネルギーだと考えられる.

当日は以上のNMRの結果を踏まえて, TTF-CAの N , I_D , I_{ND} 相におけるスピン状態を包括的に報告する.

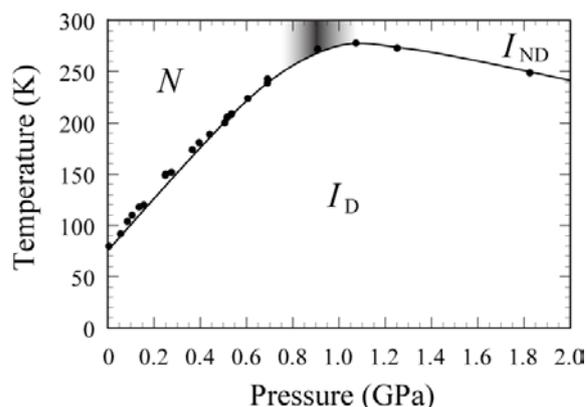


図 1. TTF-CA の相図[1]

[1] M. H. Lemée-Cailleau *et al.*, Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 1690, and F. Iwase *et al.*, 日本物理学会第 63 回年次大会, 26pTF-6 (2008).

中性-イオン性転移物質 TTF-CA の NI クロスオーバーにおける電気伝導機構の研究

東京大学工学系研究科物理工学専攻鹿野田研究室

竹原 陵介

擬 1 次元有機物質には中性 - イオン性 (NI) 転移と呼ばれる相転移を起こす物質群が存在する。この系は電荷、スピン、格子が強く絡んだ系として知られ、その結果 NI 転移系特有の現象が起きる。

NI 転移系の物質は、ドナー (D) とアクセプター (A) 2 種類の分子が交互に積層した 1 次元チェーン構造を持っている。NI 転移とは、分子間力をファン・デア・ワールス力とする中性結晶が、加圧または温度降下によって D 分子から A 分子に電子が移動し、分子間力をクーロン力とするイオン性結晶へと相転移するというものである。またこの系にはスピンパイエルス機構による D、A 分子の 2 量体化という特徴もある。これら電荷移動と分子 2 量体化が NI 転移系の大きな特徴となっている。

本研究で用いた TTF-CA は NI 転移系の典型物質として知られており、上記の 2 つの特徴により中性 (N) 相、イオン性常誘電相 (I_{para}) 相、イオン性強誘電 (I_{ferro}) 相の 3 つの相が存在することがわかっている [1][2]。電子状態としては、N 相はバンド絶縁体、I 相はモット絶縁体となっている。本研究で着目した NI クロスオーバー領域では系がバンド絶縁体からモット絶縁体が変わるため、電荷の自由度が復活するという特徴がある。電気抵抗測定の先行研究でも N 相と I 相の境界では特異な振る舞いが見られている [3]。しかしこの領域ではどのような伝導機構を持っているのか、詳細なことは未だにわかっていない。本研究はこの問題に対してアプローチしたものである。

初めに 1 次元チェーン方向の静水圧下 4 端子抵抗測定を行った。その結果、共に絶縁相であるにもかかわらず、N 相と I 相の境界で金属的な抵抗率の振る舞いおよび抵抗率極小値 (Excess Conductivity) が存在することがわかった。また Excess Conductivity は I_{para} - I_{ferro} 相間では起きず N - I 相間で起きること、本研究室の NQR、NMR 測定結果との比較からは、電荷移動度 $\rho = 0.5$ 付近かつ中性分子、イオン性分子が共存しているところから起こることがわかった。次に電気抵抗率の異方性を調べた。その結果 NI クロスオーバー領域で 1 次元チェーン方向に大きな抵抗率の異方性が現れることがわかった。以上の実験結果より NI クロスオーバーでのキャリアは NI ドメインウォール

(NIDW) ではないかと考えている。NIDW は 1 次元チェーン上に作られた N - I ドメイン境界がキャリアであると考えられるものである [4]。他の素励起とは異なり、相境界でのみ存在できるキャリアを示唆する実験結果が得られたと考えている。

当日はこれらの結果と電気抵抗の解析結果を用いて NIDW についてより詳細な発表を行いたいと思う。

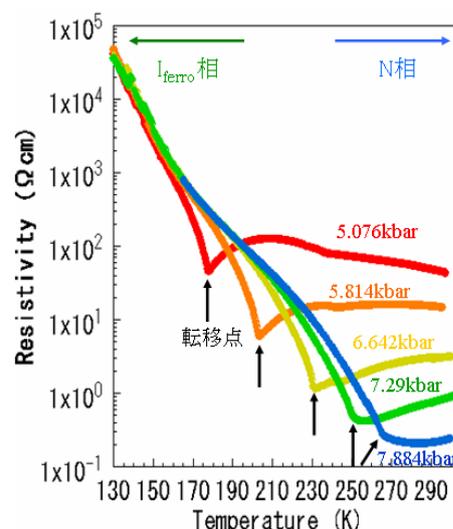


図 1. TTF-CA の各圧力での電気抵抗率温度依存性
7.29、7.884kbar が NI クロスオーバー領域

[1] M. H. Lemée-Cailleau *et al.*, PRL. **79**, 1690 (1997) [2] F. Iwase *et al.*, PSJ 2008 Spring Meeting 26pTF-6

[3] T. Mitani *et al.*, PRB, **35**, 427 (1987) [4] N. Nagaosa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., **55**, 2745(1986)

有機導体 α -(ET)₂I₃の圧力下ディラック電子相 における¹³C NMR測定

^A東大院・工・物工 ^B東理大・理工

石川恭平^A、宮川和也^A、田村雅史^B、鹿野田一司^A

圧力下 α -(ET)₂I₃ は電荷秩序相に隣接した相関の強い擬二次元ディラック電子系と考えられている。本系は代表的なディラック電子系グラフェンより多くのサイト自由度を有し(3 サイト)、その帰結として k -空間内でコーン型分散は大きく傾斜、またコーン周囲で各サイトの波動関数が異方的分布をもつ。本研究では、表題物質に対してバンド縮退点の十分近傍(低温)まで ¹³C-NMR測定を行い(図 1)、局所スピン磁化率 χ_s と核スピン緩和率 $1/T_1$ を 3 サイト毎個別に定量化、コーン形状と相関効果の関連を実験の観点から具体的に議論した初めての報告例である。これはグラフェンなどの他の系に先がけた試みと言える。本研究で得られた結果は以下のとおりである。(1) 降温により、系は高温域での二次元電子的な相から、低温域での相関の無いコーン分散へと連続的にクロスオーバーする。(2) 高温域では相関を考えないモデルに基づく理論計算よりも χ_s 、 $1/T_1$ が大きく増大するのに対し、低温域では同計算よりも大きく抑制されることが分かった。(3) 低温での χ_s 、 $1/T_1$ の抑制はサイト毎異なる温度で発現する。各サイト波動関数の異方的 k -空間分布を踏まえ、以上の結果をバンドモデルに焼き直す(図 2)と以下のような描像を得る: すなわち、『電子相関により高温域では状態密度が増大しているのに対し、低温域では抑制されている』。加えてこの『バンド変形はコーン傾斜の効果により k -空間内で異方的に(傾斜の異なる斜面ごと違うエネルギースケールで)顕在化しており、傾斜の急なコーン斜面では変形が高温 (~70K) から生じるのに対し、なだらかな斜面では低温 (~30K) まで生じてない』。

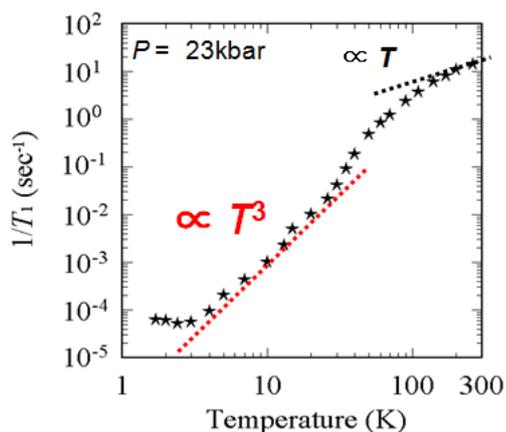


図1 緩和率の温度依存性

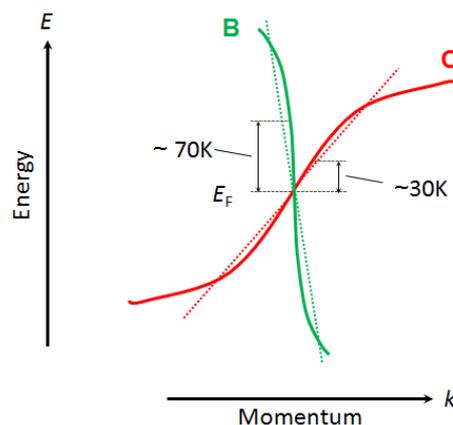


図2 電子相関効果により変形した傾斜ディラックコーン

工学系研究科 総合研究機構 幾原研究室
杉山 一生

[緒言]

結晶中に存在する欠陥である転位は、構造の乱れが線状に存在する1次元欠陥であり、結晶塑性変形の素過程である。このため、機械特性の観点から盛んに研究が行われてきたが、電気磁気特性の観点からは、これらの特性を悪化させる要因として排除するための努力がなされてきた。このような現状に対し、本研究では転位における構造の乱れを積極的に利用し、局所物性を付与[1, 2]することを考える。特に、隣り合うスピンの反対方向を向く反強磁性体である酸化ニッケルに着目した。酸化ニッケル単結晶に転位を導入し、構造を局所的に乱すことで、スピンの揃った領域を作り出し、強磁性を発現させることを目的とした。

[実験方法]

酸化ニッケル単結晶薄膜を、強力なレーザーをターゲットに照射し、ターゲット物質を基板の上に堆積させることで成膜を行うパルスレーザー堆積法により成膜を行った。 O_2 1×10^{-2} Torrの雰囲気下で100nmの成膜を行った。成膜後、1100°C大気中30分の熱処理により単結晶化を行った。成膜を行った試料について、磁気力顕微鏡(MFM)による局所磁気構造の観察、磁場中MFM観察、透過型電子顕微鏡による構造解析、SQUID式磁化測定装置によるバルクの磁化測定を行った。

[結果及び考察]

図1に示す通り、AFM高さ像中に、転位の位置に対応する窪みが観察された。AFM高さ像と全く同じ領域でMFM観察を行うと、図2に示すようにAFM高さ像中の窪みに対応する位置で周囲と異なる磁場が観察された。酸化ニッケルのバルクの領域は反強磁性であり、自発磁化を持たないことから、この領域と異なる磁場が観察されたことは、転位が自発磁化を有していることを表している。以上より、転位において強磁性が発現していることが明らかになった。更に、透過型電子顕微鏡による観察とを合わせ、自発磁化発生の要因が転位の位置に局所的に導入されたスピネル構造であることが明らかになった。

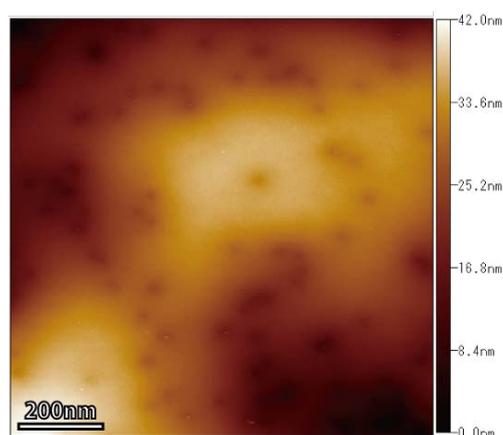


図1 AFM 高さ像

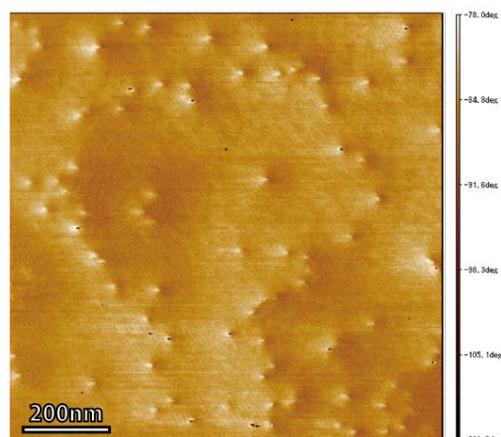


図2 MFM 位相像

[1] A. Nakamura, *et al.*, Nature Mater., 2 (2003) 456

[2] K. Szot, *et al.*, Nature Mater., 5 (2006) 312

工学系研究科 物理工学専攻 岩佐研究室

竹内 裕紀, 笠原 裕一, Kosmas Prassides, 岩佐 義宏

フラーレンはアルカリ金属をドーピングすることによって超伝導を示すことが知られているが、近年の Cs_3C_{60} の合成の成功とその物性研究により、フラーレン超伝導体では格子定数をパラメーターとして超伝導相と反強磁性相が隣接しているということが明らかになった[1]。これは銅酸化物超伝導体などによく見られる相図であり興味深い。ところがこれまでフラーレン超伝導体に関する物性研究は、嫌気性であるためにわずかな実験手法のみに限定されていた。特に基本的かつ重要な熱力学量である比熱に関しては、報告例は K_3C_{60} についてわずかに2例のみであった。このような中、我々は密閉性の高い比熱測定装置を作製し、極めて嫌気性である $\text{Li}_x(\text{THF})_y\text{HfNCl}$ および Cs_3C_{60} における超伝導、反強磁性に伴う比熱異常の観測に初めて成功した。今回はこの装置を用いてフラーレン超伝導体の比熱の系統的な観測を行ったので、これを報告する。

図1に、零磁場における各フラーレン超伝導体の超伝導転移温度付近の C/T の温度依存性を示す (C は比熱)。どの試料も、超伝導転移に伴う比熱の異常を明確に確認することができた。 K_3C_{60} の零磁場における比熱の飛びは以前の報告とほぼ一致した。またそのほかのフラーレン超伝導体の比熱の観測は、本研究が初めてである。

当日は格子定数の違いに伴う超伝導パラメーターの変化などについて議論する。

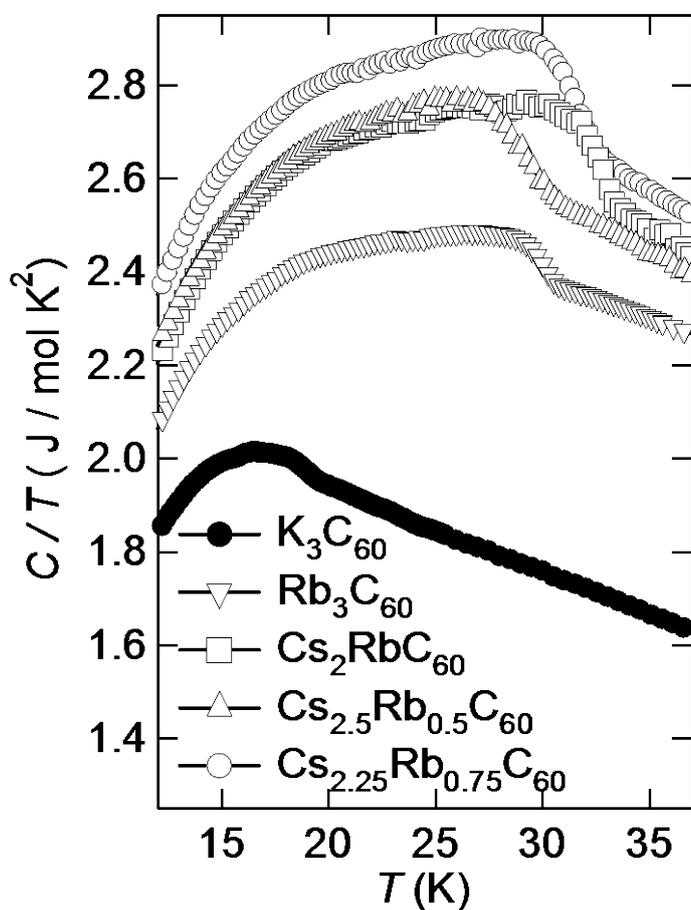


図1. 各フラーレン超伝導体の転移温度付近の C/T の温度依存性

[1] Y. Takabayashi *et al.*, *Science* **323**, 1585 (2009)

P-10 二硫化モリブデンを用いた電気二重層トランジスタ

工学系研究科 物理工学専攻 岩佐研究室

張 奕勁、叶 劍挺、岩佐 義宏

電界効果トランジスタ (FET) は現代のエレクトロニクスを支える重要なデバイスである。FETの動作の中心にあるのは、電界を印加することでチャネル表面に電荷を誘起して、チャネルに使われている半導体の電気特性を制御することである。このような電界によって電荷を蓄積する方法を電界効果ドーピングと呼び、不純物イオンを導入して電荷を変化させる化学ドーピングの並ぶ物性制御の手法である。しかし、従来の固体絶縁層 (SiO_2 や HfO_2 等) を用いたFETの電荷蓄積量は化学ドーピングのそれと比べると 1/100 以下と非常に小さいため、化学ドーピングによって実現されてきた超伝導転移等のダイナミックな物性制御は不可能であった。これに対して電気二重層トランジスタ (EDLT) はイオンを含む液体を絶縁層に用いることで、イオン半径程度の微小コンデンサーを実現し、固体絶縁層FETの 10 倍以上の電荷を蓄積することを可能にしたFETである。EDLTの電荷蓄積量は化学ドーピングに匹敵し、電界誘起による超伝導転移[1]などの物性制御を実現してきた。

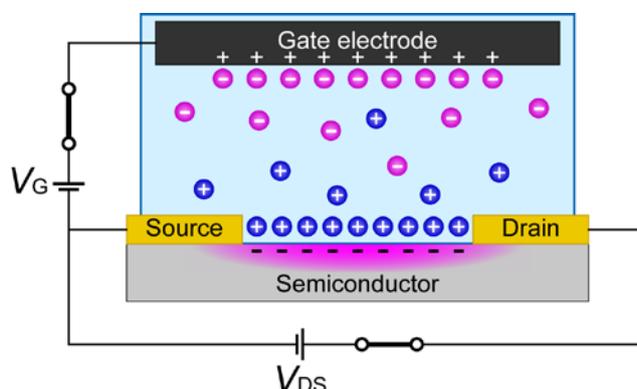


図1. 電気二重層トランジスタ (EDLT)

FET構造は様々な物質に適用可能であるが、その中でも層状物質は以前から注目されてきた。代表的な層状物質の一つである遷移金属カルコゲナ

イド (TMD) はその豊富な電子状態のために物性制御の対象として古くから研究がなされてきたが、グラフェンFETの成功に続いてFETのチャネル物質としても注目を集めるようになった。本研究では、TMDのうち最も身近な二硫化モリブデン (MoS_2) に着目した。 MoS_2 は固体潤滑剤として広く使われている物質であるが、化学ドーピングによって超伝導[2]を示すことも古くから知られている。

MoS_2 -FETは既に研究がなされており、n型半導体FETとして遜色ないデバイス特性[3]が得られている。私たちはこの物質にEDLT構造を適用することで、今まで知られていなかったp型半導体FETとしての動作を確認し、両極性トランジスタを実現[4]した。さらに、EDLT特有の化学ドーピングに匹敵する電荷蓄積によって、電界効果による絶縁体-金属-超伝導転移も実現した。

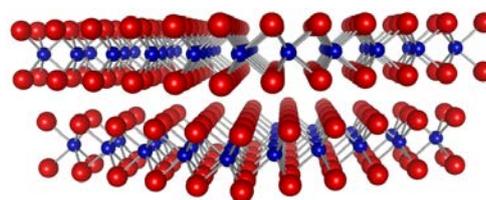


図2. 二硫化モリブデン (MoS_2)

[1] J. T. Ye *et al.* Nat. Mater. **6**, 125 (2010)

[2] J. A. Woollam *et al.* Phys. Rev. B **13**, 3843 (1976)

[3] B. Radisavljevic *et al.* Nat. Nanotechnol. **6**, 147 (2011)

[4] Y. J. Zhang *et al.* Nano Lett. accepted

P-11 MgZnO/ZnO ヘテロ接合における強相関二次元キャリアーの有効質量解析

工学系研究科・物理工学専攻・川崎研究室

Joseph Falson, Denis Maryenko, 小塚 裕介, 塚崎 敦, 川崎 雅司

近年、MgZnO/ZnO のヘテロ界面において高移動度を示す二次元電子ガスが実現された。新しい物質系における整数・分数量子ホール効果などの量子現象の観測は、低次元物性の分野に新しい舞台を提供すると期待されている[1]。この系の大きな特徴は、電子の有効質量が大きい (GaAs の約 5 倍) ことであり、電子間相互作用が強調された新しい物理現象の発見に繋がる可能性がある。

本研究では分子線エピタキシー法を用いてMgZnO/ZnOヘテロ界面を形成し、高移動度かつ電子相関の強い領域である、希薄キャリアー系の試料作製を行った。MgZnOのMg濃度を減らすにつれ、キャリアー濃度の減少とともに移動度が上昇し、最適な濃度では移動度が $\mu \sim 800,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ に達した[2]。このような試料では、キャリアー濃度が減少したため、極低温磁気輸送測定では比較的弱磁場で最低ランダウ準位の分数量子ホール状態を明確に観測できた。最低ランダウ準位の分数量子ホール状態を説明するには

「Composite Fermion」(CF)という準粒子が用いられる。CFは高磁場中で電子と磁束量子が結合した粒子であり、分数準位は有効磁場(B_{eff})で生じたCFの整数準位と解釈できる。

磁気抵抗振動の弱磁場と高磁場での温度依存性を調べると電子とCFのそれぞれの有効質量を求めることができる。図1で示したように、電子の有効質量はZnOのバンド有効質量より約60%増大し、磁場に依存しない。しかし、CFの有効質量は B に比例して増大し、GaAsとは異なった振る舞いを示した[3]。それぞれの結果は、強いキャリアー相関によって発現したと考えられ、この系において初めて見いだされた現象である。

今後、MgZnO/ZnO系は、低次元物性の分野で様々な新しい物理現象を提供しうる貴重な物質系になると考えられる。

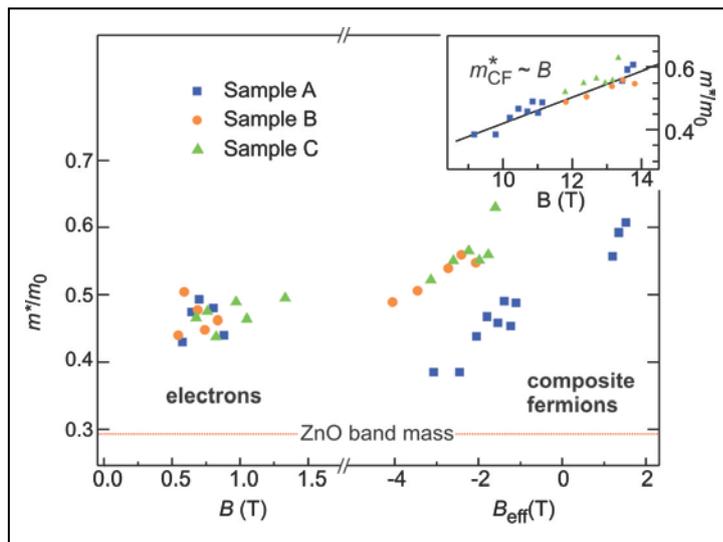


図1. 三つの高移動度試料(A, B, C)の電子とCFの有効質量(m^*/m_0)の磁場依存性の比較。電子は実磁場 B 、CFは有効磁場 B_{eff} に対してプロット。

[1] A. Tsukazaki, *et al.*, *Nature Materials* **9**, 889 (2010)

[2] J. Falson, *et al.*, *Appl. Phys. Express* **4**, 091101 (2011)

[3] H. C. Manoharan, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 3270 (1994)

P-12 Co 添加 ZnO 系ヘテロ構造における異常ホール効果の観測

¹工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター、²工学系研究科総合研究機構
塚崎敦¹, 柴田直哉², 幾原雄一², 川崎雅司¹, 永長直人¹, 十倉好紀¹

近年、電荷とスピンを独立に制御することを目的としたスピンエレクトロニクスが盛んに研究されており、本研究では、酸化物半導体として知られる酸化亜鉛 (ZnO) をベースに高品質ヘテロ構造を作製し、電荷としての高移動度二次元電子系とスピんに寄与するであろう磁性不純物コバルトとの相互作用について調べた。二次元電子系は、ウルツ鉱構造に由来する自発分極が要因となって生成される。これまでに、ZnサイトをMgで置換したMgZnOとZnOの界面において、高移動度二次元電子系における量子ホール効果などの研究が行われてきた。その界面では、近年、界面品質の向上と試料構造の最適化がなされ、低温における電子移動度は約 $800000\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ に達し、分数量子ホール効果の観測も報告されている[1,2]。また、磁性不純物であるコバルト添加ZnOにおいては、これまでに大きな磁気円二色性を示すことが知られており、p-d交換相互作用が示唆されている[3]。

試料は、Zn 極性 ZnO 単結晶基板上に分子線エピタキシー法を用いて作製した。ZnO バッファー層を堆積後、コバルト添加層として CoZnO 層を積層した。ドナーとなりうる 3 価のカチオンはドーピングしていない。低温での伝導特性評価のために、フォトリソグラフィによるレジストのパターニングとイオンミリングを用いてホールバー形状にエッチングし、その後オーミック電極として Au/Ti を蒸着した。測定には、カンタムデザイン社の PPMS を用いた。

図 1 に示すように、低温で金属的な抵抗率の温度依存性を示した。ドナー添加は行っていないため、積層構造中に自発分極差を生じて新たな電子系が生成されているものと考えられる。2K、磁場中で磁気抵抗とホール抵抗を測定したところ、正の磁気抵抗とともに、異常ホール項の重畳した非直線的なホール抵抗の磁場依存性が得られた。さらに、4 テスラ以上の高磁場では磁気抵抗振動が観測されたことから、高い移動度を有していることがわかる。以上の結果は、コバルトの添加されたヘテロ構造においても二次元電子系が生成されると同時に、コバルトとの相互作用を生じることで異常ホール効果が発現していると考えられる。今後、電界効果などの適用によって伝導度制御と同時に磁気的性質の制御が可能になるよう期待される。

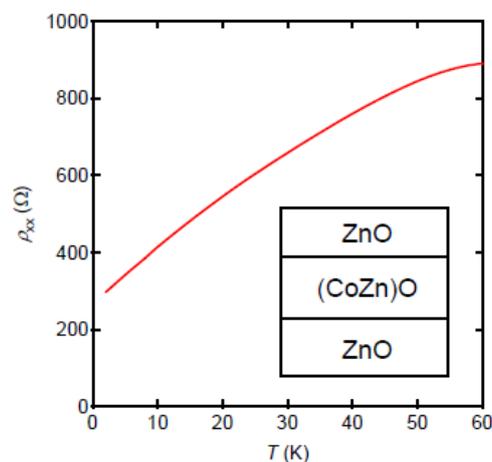


図 1. 抵抗率の温度依存性。
内挿図は試料積層構造。

[1] A. Tsukazaki *et al.*, Nature Mater. **9**, 889 (2010).

[2] J. Falson *et al.*, Appl. Phys. Express **4**, 091101 (2011).

[3] K. Ando *et al.*, Appl. Phys. Lett. **78**, 2700 (2001).

P-13 自己形成 InAs 量子ドットにおける g-テンソルの

電氣的制御

工学系研究科 物理工学専攻 樽茶大岩研究室

金井康, R. S. Deacon, 高橋駿, 吉田勝治, 柴田憲治, 平川一彦, 大岩顕, 樽茶清悟

電子のスピン状態の制御における重要なパラメータとしてg因子がある。特にg-因子をテンソルとみなし、それを電氣的に制御することが可能であれば、g-テンソルを時間的に変化させることで実効的な交流磁場を作ることができる (g-テンソル変調共鳴)。g-テンソル変調共鳴によって電子スピンの操作が可能であり、g-テンソル変調共鳴は二次元電子系においてすでに行われている[1]。量子ドット系ではg-因子が異方的であることが実験的に観測されているが[2]、g-テンソルの電氣的制御は実現されておらず、g-テンソル変調共鳴は未だ実現されていない。しかしながら、大きなg-因子を持つInAs系であれば、g-テンソル変調共鳴によって電子スピンを高速に制御できると考えられる。本発表では、自己形成InAs量子ドットにおいて、電氣的g-テンソル制御について発表する。試料の面内に磁場を印加しながら試料を面内回転 (θ) させることにより、g-因子の面内異方性を観測し、面内のg-テンソルを測定した。バックゲート (V_{bg}) とサイドゲート (V_{sg}) により、量子ドット内の閉じ込めポテンシャルを変調させることで、g-テンソルの制御を実現した(図 2)。得られた実験値から、自己形成 InAs量子ドットにおけるg-テンソル制御による電子スピン制御の評価を行った。

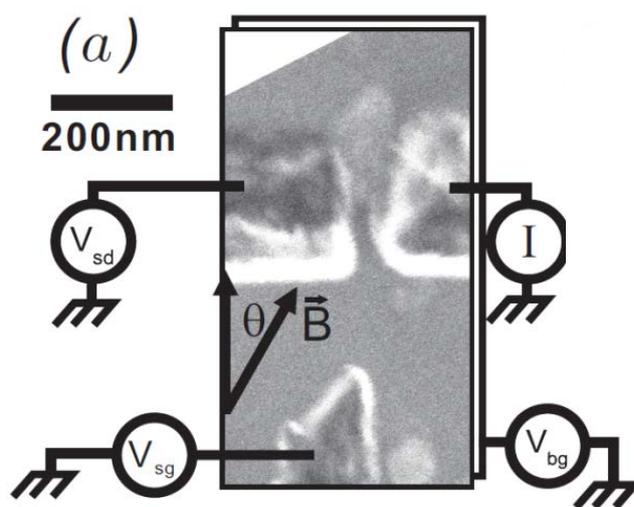


図 1: 試料の SEM 写真と測定系

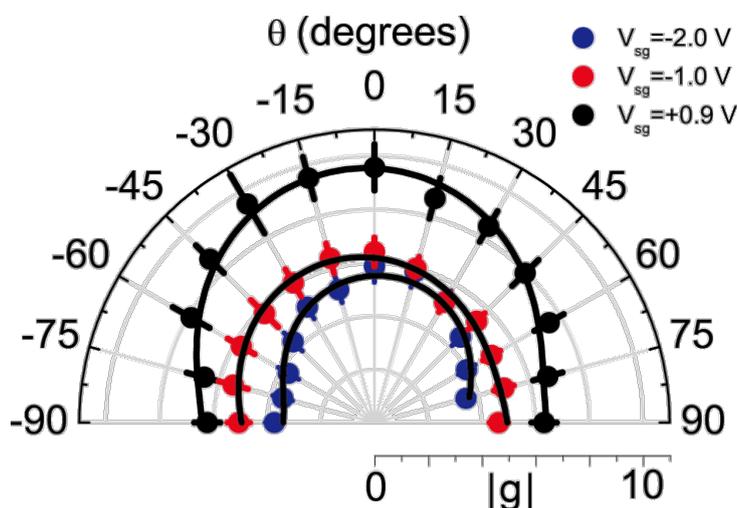


図 2: g 因子の θ , V_{sg} 依存性

[1] Y. Kato et al., Science 299, 1201 (2003)

[2] S. Takahashi et al., PRL 299, 1201 (2010)

P-14 半導体量子ドット中の単一スピンの高速化

東京大学 工学系研究科 物理工学専攻

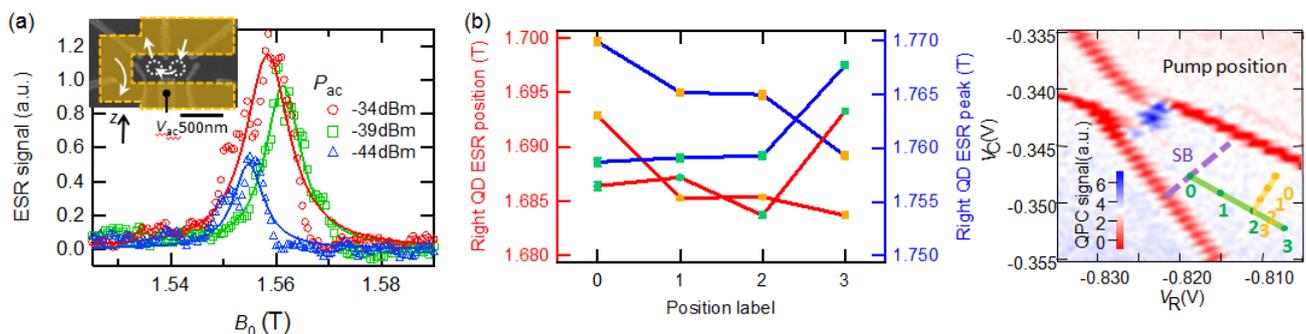
大塚朋廣* 米田淳* 高倉樹 武田健太 吉田勝治 小幡利顕 樽茶清悟

半導体量子ドット中の電子スピンは、固体中の量子計算素子の有力候補と考えられている。量子計算に必要な要素の多くが、GaAs系量子ドットを用いた最近の実験で示されてきたが、未解決の課題として量子ビットの多重化、ユニバーサル量子ゲートの実証が残っている。ユニバーサル量子ゲートの実証では、必要な各操作は実現されているものの、デコヒーレンスにより操作時間中に忠実度が低下することが問題である。そこで我々はスピン操作を高速化することを目指して研究を行った。

単一電子スピンのX,Y回転を行うため、我々はドット直上に配置した微小磁石の作り出す傾斜磁場を利用した電子スピン共鳴(ESR)を用いている[1]。この方法ではRabi周波数は傾斜磁場の勾配と駆動電場振幅に比例する。これらを増強して操作を高速化するため、微小磁石形状、表面金属電極デザイン等の改良を行い、試料を作製した(図(a))。シミュレーションでは、従来のラビ周波数の報告値10MHz[2]に比べ、この試料では5倍以上の高速なESRが得られると期待された。

実際に観測されたESRピークの駆動電場電力依存性を図(b)に示す。駆動電場電力を大きくするとESRピークが広がる様子が観測され、これはスピン回転操作が高速化したことを示唆している。スピン反転時間がデコヒーレンス時間よりも短い領域では、ピーク幅からRabi周波数を見積もることができ、駆動電場電力-34dBmにおいて24MHzが得られた。

またESRにより実現されるX,Y回転の他に、Z回転もユニバーサル量子ゲートの実現に有用な操作である。Z回転の実装方法として、我々は微小磁石の空間的に不均一な磁場を利用した方法を提案した。Larmor歳差運動を利用してZ回転を実現でき、さらに電極電圧を操作してドットの位置を不均一磁場の中で操作することにより局所磁場を制御し、Z回転を制御できる。我々はこの手法の実現可能性を検証するため、電極電圧によって局所磁場をどれだけ制御できるかを測定した(図(b))。この結果、10mT程度の磁場制御が可能であり、50MHz程度のZ回転操作が実現可能であることが分かった。



*Equal contribution

[1] Y. Tokura *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 047202 (2006), M. Pioro-Ladrière *et al.*, *Nat. Phys.* **4**, 776 (2008).

[2] T. Obata *et al.*, *Phys. Rev. B* **81**, 085317 (2010).

ドット間トンネリング検出

工学系研究科・物理工学専攻・樽茶・大岩研究室

藤田高史, 木山治樹, 森本和博, 寺岡総一郎, Giles Allison, 大岩顕, 樽茶清悟

最近我々のグループは、横型量子ドットにおいて単一光子の補足に成功した[1]。本発表では、ドット数を増やした2重量子ドットにおける単一光励起電子の捕捉について発表する。2重量子ドットを用いることは、光励起電子の補足後における電子スピン操作や観測へとつながる重要なステップである。特に、補足後の単一電子ドット間トンネリングを実時間で観測したことで、より明瞭に励起電子の補足が区別可能になり、さらには2電子補足の観測にも成功した。

試料はGaAs系横型二重量子ドットで、780nmの微弱パルス光を照射すると、左ドット上の開口(図1)を通過した光子で励起された電子がドットに捕捉される。光励起電子が緩和する準位と、隣接ドットの励起準位が一致する場合、外部電極へ抜ける前に、光励起電子がドット間を遷移する。またドット間遷移の速さは、ゲート電圧で調整可能である。

電子状態の測定には、量子ポイントコンタクト(QPC)に流れる電流を利用し、光パルス照射時の電子数変化を実時間で測定した。図は、パルス照射時における光励起電子のドット間遷移を示す一例である。電流値が大きく上下に振動しており、光励起電子が左右のドット間を遷移する様子が確認できた。このような明らかなドット間遷移は単一電子を捕捉した場合に限って観測される。一方、複数の光電子捕捉の場合には、電流振動の前段階に振動を伴わないで電流変化が起こることを利用して区別することができる。

このms以下のドット間遷移を利用すれば、スピン閉塞により単一光電子のスピンを読み取ることができ、将来的には光子偏光から電子スピンへの量子状態転写[2]を単一量子間で実証することを目指している。

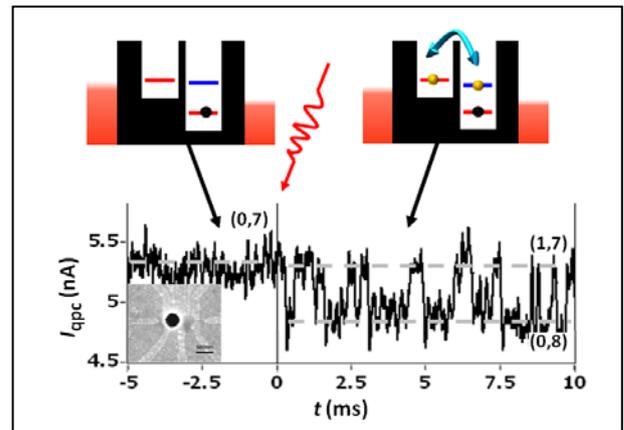


図1. 捕捉後に単一光励起電子がドット間で変動している様子を示したQPC電流。信号は(1,7)-(0,8)電荷遷移点で取った。

[1] A. Pioda, E. Totoki, H. Kiyama, T. Fujita, G. Allison, T. Asayama, A. Oiwa and S. Tarucha, Phys. Rev. Lett. **106**, 146804 (2011).

[2] H. Kosaka, H. Shigyou, Y. Mitsumori, Y. Rikitake, H. Imamura, T. Kutsuwa, K. Arai and K. Edamatsu, Phys. Rev. Lett. **100**, 096602 (2008).

P-16 PLD法によるBi₂Se₃単結晶薄膜の作製と キャリア制御

東大工^A, ERATO-MF^B, 理研CMRG・CERG^C
吉見龍太郎^A, 小野瀬佳文^{A,B}, 塚崎敦^A, 袁洪濤^A, 日高剛朗^A,
高橋圭^C, 岩佐義宏^{A,C}, 川崎雅司^{A,C}, 十倉好紀^{A,B,C}

Pulsed Laser Deposition and Ionic Liquid Gate Control of Epitaxial Bi₂Se₃ Thin Films

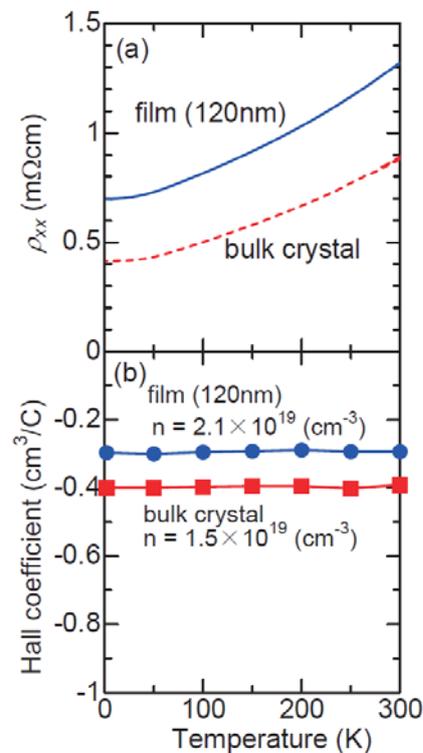
Univ. of Tokyo^A, ERATO-MF^B, RIKEN-CMRG-CERG^C

R. Yoshimi^A, Y. Onose^{A,B}, A. Tsukazaki^A, H. T. Yuan^A, T. Hidaka^A,
K. S. Takahashi^C, Y. Iwasa^{A,C}, M. Kawasaki^{A,C}, and Y. Tokura^{A,B,C}

トポロジカル絶縁体とは、バルク状態にはバンドギャップが開いているが、表面ではギャップレスで金属的な表面状態を有する系である。表面バンドはスピン偏極したバンドが対を成しており、特にBi₂Se₃においては直線的にバンドが交差してディラックコーンを形成しているためスピントロニクスの観点から近年盛んに研究されている。ところが、表面状態の存在は角度分解光電子分光などの超高真空下での実験で確認されている一方、バルクキャリアの寄与が支配的であるためスピン偏極した表面状態の特徴は輸送現象においてほとんど確認されていない。輸送現象における表面状態の観測という目的に対して、薄膜試料の作製はバルクの寄与を抑え、またゲート構造による電界効果等のデバイス制御を用いてキャリア制御ができるため有効な手段であると考えられている。

我々はパルスレーザー堆積(PLD)法によってBi₂Se₃の単結晶薄膜を作成した。図に示す様に薄膜Bi₂Se₃はバルクと類似の輸送特性を示した。また電解液を用いたゲート構造を作ることによって電子濃度を10¹⁴cm⁻²程度減らすことに成功した。さらに表面状態の輸送全体に対する寄与を調べるためゲート電圧に対する磁気抵抗の変化を詳細に調べた。また、この系で観測された磁気抵抗の振る舞いとスピン軌道相互作用の強い系における二次元反局在の理論との比較について議論を行った。

本研究の一部は日本学術振興会の最先端研究開発支援プログラムにより助成を受けて行われた。



¹Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo²II. Institute of Physics B, RWTH Aachen, GermanyJ.R. Bindel^{1,2}, K. Nakayama¹, T. Matsui¹ and Hiroshi Fukuyama¹

Graphene has been of great interest for a great number of experimental studies since its discovery in 2004 [1]. It exhibits linear energy dispersion around the K point in the Brillouin zone, due to which the carriers can be described as massless Dirac fermions with relativistic character. It is also a convincing material for future electronics with its high durability, large flexibility and high mobility ($> 2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) even at room temperature [2]. However, the absence of a band gap is a task to be overcome for such applications. We are studying a possible band gap opening due to sublattice symmetry breaking by adsorbing atoms in a $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ manner relative to the honeycomb lattice of graphene [3]. This possibility had already been demonstrated on the surface of graphite [4], a multi-layer of graphene. It is shown that Kr and Xe form a $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ structure on graphite with an energy gap of about 0.6 eV (Fig. 1(a)).

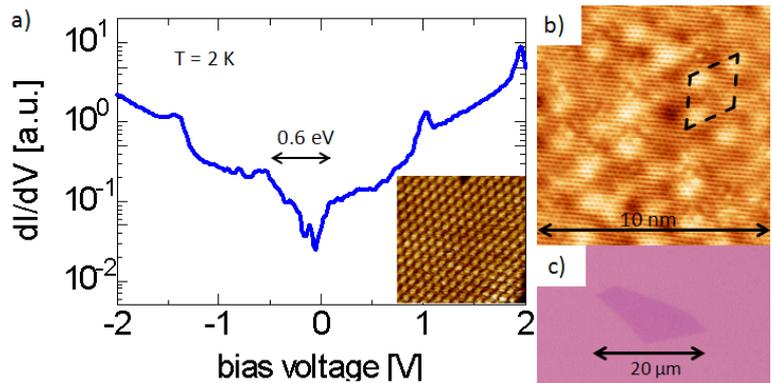


Fig.1. a) dI/dV spectrum obtained on $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ structure of Xe adsorbed on graphene. The inset shows a STM image of adsorbed Xe atoms ($6 \times 6 \text{ nm}^2$). b) STM image of graphene on SiC with atomic resolution. 6×6 superstructure unit cell is marked with dashed line. c) Optical microscope image of exfoliated graphene on SiO_2 substrate.

Two kinds of graphene are investigated in this study depending on the measurement. One is a graphene epitaxially grown on a Si-face of 4H-SiC* (Fig. 1(b)), and the other is the one exfoliated on SiO_2 substrate (Fig. 1(c)). One can obtain large graphene spreading over a substrate with the former graphene, but it is strongly coupled to the substrate resulting in a 6×6 superstructure as seen in Fig. 1(b). In contrast, the latter graphene couples to substrate rather weakly, but the flake size is limited to about a few tens of μm instead. The electronic properties of Kr atoms adsorbed on SiC-graphene and exfoliated-graphene studied with ULT-UHV-STM ($p < 10^{-8} \text{ Pa}$, $T > 30 \text{ mK}$) and transport measurement, respectively, will be presented.

*supplied by Dr. H. Hibino of NTT Basic Research Laboratories.

[1] K. S. Novoselov et al., Science **306**, 666 (2004).

[2] A.H. Castro Neto et al., Rev. Mod. Phys. **81**, 109 (2009), A.K. Geim et al., Nature Mat. **6**, 183 (2007).

[3] M. Farjam and H. Rafii-Tabar, Phys. Rev. B **79**, 045417 (2009).

[4] T. Matsui et al., JLTP **126**, 373 (2002); N. Mori et al., JLTP **110**, 641 (1998); C. Bäuerle et al., JLTP **113**, 927 (1998).

P-18 集積型コバルト-オクタシアノタングステン金属錯体の光磁性現象

理学系研究科 化学専攻 大越研究室

尾崎 仁亮、所 裕子、大越 慎一

オクタシアノ金属錯体は、多彩な配位構造をとるため、熱や圧力、光などの外部刺激に応答する可能性を秘めている。当研究室では、オクタシアノ金属錯体を用いて種々の光磁性体を報告してきた [1-3]。例えば Co-W オクタシアノ金属錯体に pyrimidine を有機配位子として導入した $\text{Co}_3[\text{W}(\text{CN})_8]_2(\text{pyrimidine})_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ では、磁気相転移温度 (T_c) 40 K, 保磁力 (H_c) という優れた光磁気特性を報告している。本研究では、2 種類の有機配位子、pyrimidine および 4-methylpyridine を導入した $\text{Co}^{\text{II}}_3[\text{W}^{\text{V}}(\text{CN})_8]_2(\text{pyrimidine})_2(4\text{-methylpyridine})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (**1**) を合成し、その光磁気効果の検討を行った [4]。

錯体 **1** は $\text{Co}^{\text{II}}\text{Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Cs}^{\text{I}}_3[\text{W}^{\text{V}}(\text{CN})_8]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、pyrimidine、4-methylpyridine を水溶液中で混合することにより粉末として得た。錯体 **1** の結晶構造は三斜晶系の $P\bar{1}$ であり、Co と W はシアノ基により架橋され擬 2 次元的な 3 次元ネットワーク構造を形成していた (図 1)。錯体 **1** の磁化率の温度依存性を調べると、170 K 付近で高温相から低温相へ、140 K 付近で低温相から高温相への相転移現象が観測された。紫外可視光スペクトルおよび赤外吸収スペクトルの温度依存性の結果より、この相転移現象は、高温相 $\text{Co}^{\text{II}}_{hs}(S=3/2)-\text{W}^{\text{V}}(S=1/2)$ と低温相 $\text{Co}^{\text{III}}_{ls}(S=0)-\text{W}^{\text{IV}}(S=0)$ 間の、電荷移動型スピン転移現象 (CTIST) によることが示唆された。次に、光磁気効果の検討を行った。図 2a に照射前の磁場中冷却磁化曲線を示す。照射前の低温相は常磁性的な挙動を示したが、この状態に 2 K で 785 nm 光を照射すると、磁気相転移温度 48 K のフェロ磁性体へと転移した。また、照射後の外部磁場-磁化曲線を 2 K にて測定すると、保磁力 27000 Oe を伴う磁気ヒステリシスが観測された (図 2b)。これらの値はいずれも、光磁性体としては最高の値である。さらに、これらの光誘起相を 170 K で熱処理することにより、常磁性体に戻ることを確認した今回観測した光磁性現象のメカニズムは、785 nm の照射により Co と W の電荷移動吸収帯を引き起こしたことによる、光誘起 CTIST と考えられる。

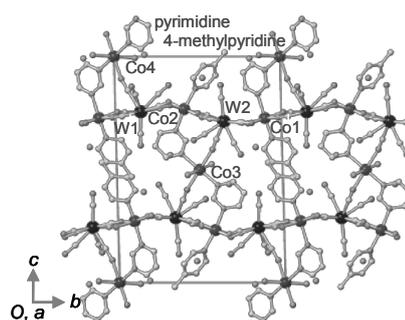


図1. 錯体1の結晶構造.

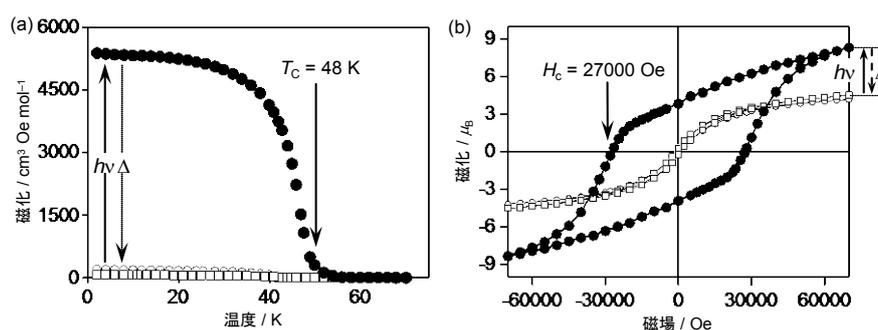


図2. 錯体1の光磁気特性 (a) 磁場中冷却曲線および (b) 磁場—磁化曲線. 照射前(□)、照射後(●)および熱処理後(○).

[1] S. Ohkoshi, S. Ikeda, T. Hozumi, T. Kashiwagi, K. Hashimoto, *J. Am. Chem. Soc.*, 128, 5320 (2006).

[2] S. Ohkoshi, Y. Hamada, T. Matsuda, Y. Tsunobuchi, H. Tokoro, *Chem. Mater.*, 20, 3048 (2008).

[3] S. Ohkoshi, K. Imoto, Y. Tsunobuchi, S. Takano, H. Tokoro, *Nature Chemistry*, 3, 564 (2011).

[4] N. Ozaki, H. Tokoro, Y. Hamada, A. Namai, T. Matsuda, S. Kaneko, S. Ohkoshi, *Adv. Funct. Mater.*, in press.

P-19 プルシアンブルー類似体における高プロトン伝導の観測

理学系研究科化学専攻大越研究室

中川幸祐、所裕子、大越慎一

近年、電気物性と磁気物性が共存する材料が注目を浴びている。当研究室はこれまでに、磁気-電気的相关に着目し、強誘電-強磁性錯体や非線形磁気光学効果を示す錯体など、新規機能性を有するシアノ架橋型金属錯体を報告してきている [1,2]。本研究では、湿度応答型磁性材料である 6 配位型シアノ架橋型錯体 $\text{Co}^{\text{II}}[\text{Cr}^{\text{III}}(\text{CN})_6]_{2/3} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ($T_c = 22 - 28 \text{ K}$) [3] において、 $\sigma = 1.2 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ という高い伝導性を見出したので報告する [4]。

本錯体は、 $\text{Co}^{\text{II}}\text{Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 水溶液を $\text{K}_3[\text{Cr}^{\text{III}}(\text{CN})_6] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 水溶液に滴下し、吸引濾過することにより桃色の粉末試料として得た。試料の形状は、透過型電子顕微鏡 (TEM) により観察した。伝導度の測定はインピーダンスアナライザー (Agilent Technologies 社製 4294A) を用いて行った。印加電圧は 500 mV で、周波数は 40 Hz から 110 MHz までの範囲で測定した。湿度は自作の湿度制御系で制御した。

TEM 観察の結果より、本錯体の粒径は約 55 nm であると求められた。粒子像は正方形で、粒子が立方体であることが示唆された。室温において本錯体の伝導度を測定したところ、湿度 100% RH で図 1 (○) のような複素インピーダンスプロットが得られた。このときの伝導度 (σ) は $1.2 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ であった。次に、本錯体を加熱して測定すると、伝導度は増加していき、308 K では $1.7 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ という値を示した [図 1 (●)]。この結果にもとづく $\ln(\sigma T)$ 対 T^{-1} プロットより、活性化エネルギーは 0.22 eV と見積もられた (図 1 挿図)。さらに伝導度の湿度による変化を測定したところ、湿度の減少に伴って伝導度は著しく低下し、8% RH では $\sigma = 3.2 \times 10^{-8} \text{ S cm}^{-1}$ という値を示した (図 2)。この湿度依存性の結果より、本錯体の高い伝導率は、結晶中の水分子を介したプロトン伝導によることが示唆された (図 3)。従って本錯体はプロトン伝導に基づく超イオン伝導体であると考えられる。

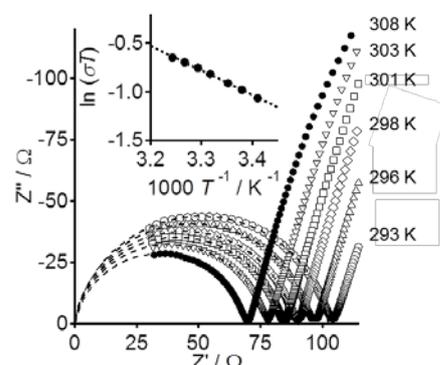


図 1. $\text{Co}^{\text{II}}[\text{Cr}^{\text{III}}(\text{CN})_6]_{2/3} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ の複素インピーダンスプロット (100% RH). (挿図) $\ln(\sigma T)$ 対 T^{-1} プロット.

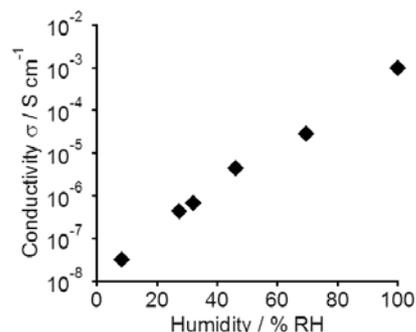


図 2. $\text{Co}^{\text{II}}[\text{Cr}^{\text{III}}(\text{CN})_6]_{2/3} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ における湿度依存性.

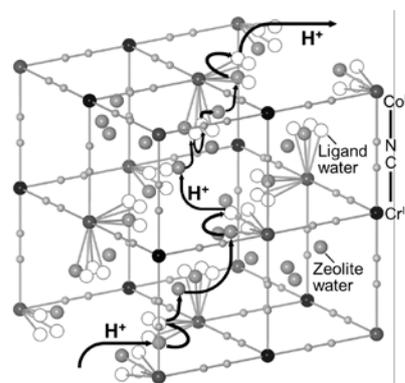


図 3. $\text{Co}^{\text{II}}[\text{Cr}^{\text{III}}(\text{CN})_6]_{2/3} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ の結晶構造とプロトン伝導経路の一例.

- [1] S. Ohkoshi, H. Tokoro, T. Matsuda, H. Takahashi, H. Irie, K. Hashimoto, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 46, 3238 (2007). [2] K. Nakagawa, H. Tokoro, S. Ohkoshi, *Inorg. Chem.*, 47, 10810 (2008). [3] S. Ohkoshi, K. Arai, Y. Sato, K. Hashimoto, *Nature Materials*, 3, 857 (2004). [4] S. Ohkoshi, K. Nakagawa, K. Tomono, K. Imoto, Y. Tsunobuchi, H. Tokoro, *J. Am. Chem. Soc.*, 132, 6621 (2010).

P-20 ラムダ型五酸化三チタンにおける光可逆金属—半導体転移

理学系研究科化学専攻大越研究室
箱江史吉、所裕子、生井飛鳥、大越慎一

白色の顔料として広く用いられ、近年は光触媒として研究が盛んに行われているTiO₂に対し、その還元体であるTi₂O₃、Ti₃O₅、Ti₄O₇は、Ti³⁺を含むことで黒色を呈し、いずれも金属—絶縁体転移を示す相転移物質である。我々の研究グループは、化学的な手法によって、新種の酸化チタンであるラムダ型五酸化三チタン(λ -Ti₃O₅)ナノ微粒子の合成に成功し、この物質が室温でベータ型五酸化三チタン(β -Ti₃O₅)との間を可逆的に光誘起相転移することを見出した[1]。本発表では λ -Ti₃O₅の合成、結晶構造、磁気物性、及び光誘起相転移とそのメカニズムに関して報告する。

ナノ微粒子の合成は、逆ミセル法とゾルゲル法の組み合わせによって行った。透過型電子顕微鏡により20 nmのナノ微粒子の生成を確認した(図1a)。粉末X線回折より、これまで報告された酸化チタンの相に帰属できない新規な相(λ -Ti₃O₅と命名)であることがわかり、Rietveld解析によりその結晶構造を決定した(図1b)。磁化率の温度依存性より、 λ -Ti₃O₅は、従来のバルクなTi₃O₅における β -Ti₃O₅(非磁性半導体)とは異なり、 α -Ti₃O₅(常磁性金属)と近い高い値を示し、金属の性質を示すことが分かった(図1c)。室温で λ -Ti₃O₅(深青色)へ532 nmのパルスレーザー(6 ns, 1.5×10⁻⁵ mJ μ m⁻² pulse⁻¹)を照射したところ、 β -Ti₃O₅(茶色)へと相転移した。更に、410 nmのレーザー(8×10⁻³ mW μ m⁻²)を照射したところ照射部は λ -Ti₃O₅(深青色)へ戻った(図2)。以上より、 λ -Ti₃O₅が光誘起金属—半導体相転移を可逆的に示すことが分かった。この光誘起相転移のメカニズムを理解するため、Ti₃O₅の熱力学的エネルギーを平均場モデルによって計算した。結果、この光誘起相転移は熱力学的なエネルギー極小状態にいる準安定相である λ -Ti₃O₅と真の安定相である β -Ti₃O₅との光照射による相転移であることがわかった。

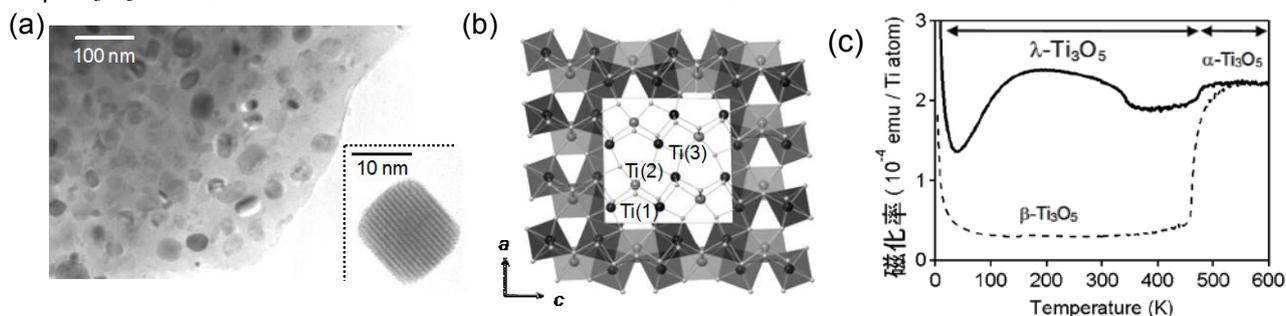


図1. (a) λ -Ti₃O₅ ナノ結晶のTEM像. (b) λ -Ti₃O₅の結晶構造. (c) λ -Ti₃O₅と β -Ti₃O₅単結晶の χ vs T 曲線[1].

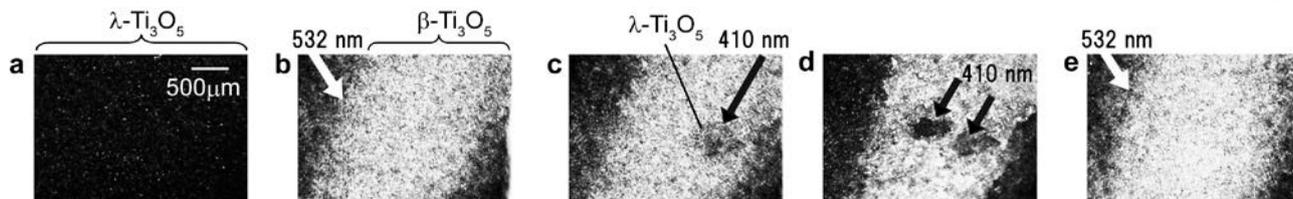


図2. レーザー光照射による λ -Ti₃O₅の写真. 色相の繰り返し変化が観察された(灰色部は、茶色に相当)[1].

[1] S. Ohkoshi, Y. Tsunobuchi, T. Matsuda, K. Hashimoto, A. Namai, F. Hakoe, H. Tokoro, *Nature Chemistry*, 2, 539 (2010). [This paper is highlighted in *Nature Chemistry*, “News & Views”, 2, 517 (2010); *Nature Materials*, “Commentary”, 10, 158 (2011)]

P-21 GaAs 劈開表面上に形成した金属超薄膜の超伝導

理学系研究科 物理学専攻 岡本研究室

関原 貴之、枡富 龍一、岡本 徹

2次元の超伝導は量子的ゆらぎに対して壊れやすいものであり、超伝導が起こる2次元の極限はどこか、特に薄膜化していくことで、クーパ対の形成にどのような影響がでるか疑問が持たれてきた。また、量子サイズ効果によって、超伝導転移温度が膜厚に対して振動するなどの現象も見られることや、ナノテクノロジーへの応用的見地からも、薄膜の超伝導は興味を持たれてきた。一般に、膜厚を減少させると、系の乱れが増加し、超伝導体が絶縁体に転移するが、清浄な劈開表面を使うことにより、乱れを抑え、超伝導体薄膜の極限での電気伝導特性を調べることを目的として研究をおこなった。

技術的には、あらかじめ側面に金属電極をつけた半絶縁性 GaAs 単結晶を低温・高真空下で劈開し、その表面にその場で Pb や Bi を低温蒸着した系に対して4端子測定をおこなった。また、我々の実験装置では、任意の方向に磁場をかけることができる。

図1はPbの超伝導転移温度と膜厚の関係である。1原子層以下に相当する膜厚においても $T_c = 0.90$ Kの超伝導転移が観測された。この薄膜の常伝導状態の面抵抗は、 4.35 k Ω / \square であった。

図2はその薄膜の垂直磁場依存性である。B=9Tで回転させて印加させた場合も0Tから上昇させた場合も面抵抗の垂直磁場依存性は変わらず、9Tの平行磁場は超伝導に影響を与えないことが分かった。スピンのゼーマン分裂に起因する対破壊効果によって、上部臨界磁場に限界があることが知られており(パウリ限界)、その計算値は2T以下であり、この結果と大きく矛盾する。我々の系では、空間反転対称性が破れており、スピン軌道相互作用が強いことが期待される。Rashba効果が超伝導の形成に関与している可能性も検討している。

成膜は低温でおこなっているため、アモルファス(非晶質な)薄膜と考えているが、現在STMによる表面観察をおこなうところである。

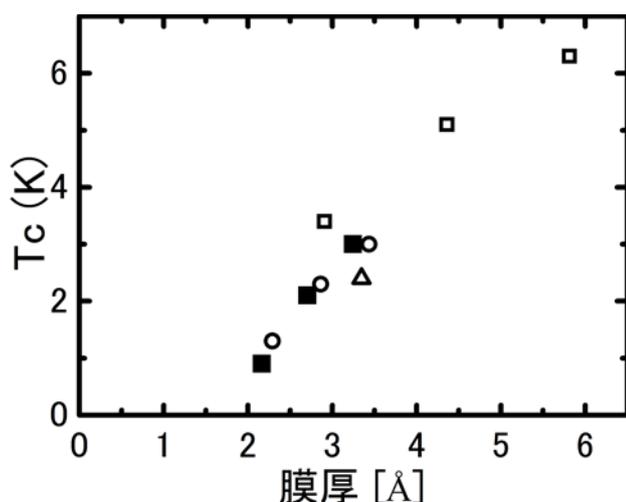


図1: Pb 薄膜の膜厚と超伝導転移温度の関係

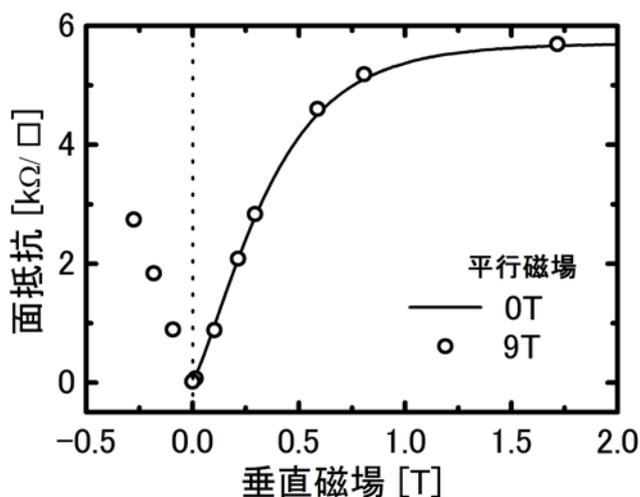


図2: Pb 薄膜 0.22nm の面抵抗の垂直磁場依存性

P-22 繊維化疾患治療に向けた核内レセプターリガンドの創製

とその複合体の構造科学的解明

—液体窒素温度と室温で測定された構造をもとに—

薬学系研究科・蛋白構造生物学教室

桑原直之、浅野理沙、伊藤一明(筑波大学)、柳澤純(筑波大学)、宮地弘幸(岡山大学)、清水敏之

蛋白質の結晶構造解析では4–20°Cで析出したタンパク結晶を液化窒素の沸点温度近くの100K程度まで冷却し、X線回折実験を行なうことが一般的になっている。これによりX線照射による結晶試料の劣化を著しく低減することができる。また強力な放射光X線を用いる場合には、この操作は必須となっている。

SmadはTGF β シグナル経路の下流にあり、そのシグナルの過剰な活性化により線維化疾患を引き起こすことが知られている。現在までにTGF- β を標的にした治療薬が開発されているが、TGF- β 活性の阻害は深刻な副作用を引き起こすことがわかっている。我々は核内受容体のビタミンD受容体(VDR)がリガンド依存的にSmadシグナル経路を阻害する作用に注目し、効果的な線維化疾患の治療薬の創製を目指している。本研究ではVDRとリガンド複合体の結晶構造からVDRの転写活性及びSmad分解活性の構造機能相関を明らかにすることを目的とした。

我々はVDRのリガンド結合部位(LBD)とsecosteroid型

(1,25(OH)vitaminD₃)、nonsecosteroid型(TTYN化合物)の2種類のリガンドとの複合体構造を解いた。2種のリガンドの構造は異なっているにもかかわらず、LBDの構造は変化が見られなかった。この結果により、本研究で作製したnonsecosteroid型のTTYN化合物も天然のリガンドである1,25(OH)vitaminD₃と同様な機構で転写活性化能を上昇させていることを明らかにした。さらにTTYN化合物とLBDの相互作用部位の構造解析から、TTYN化合物による転写活性化と構造との相関を得ることができた。本研究により、これまで明らかになっていなかったSer271による基質結合部位の安定化と転写活性化への関与を明らかにした。さらにSmadとの相互作用機構を明らかにすることで、線維化疾患に効果的な治療薬の創製が可能になると考えている。

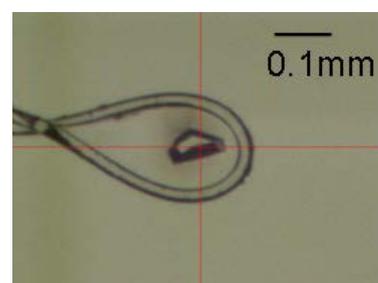


図 1. 100K まで冷却した VDRLBD 結晶

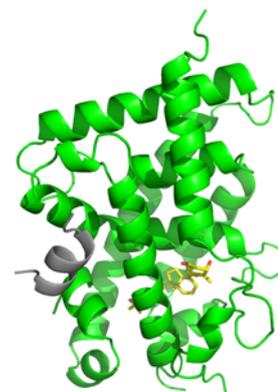


図 2. X線結晶構造解析により明らかにした VDRLBD 立体構造 (リボンモデル)

低温センター

阿部美玲、加茂由貴、志村芽衣、佐藤幸一、戸田亮

本発表では、低温センターからの寒剤（液体窒素・液体ヘリウム）供給の受け方を簡単に説明し、本郷キャンパスで寒剤が使用されている建物を紹介する。また、平成 23 年度より新たに設けた「寒剤管理連絡担当者」について説明する。低温センターでは今後、寒剤管理連絡担当者と協力して、建物ごとの集配場所や寒剤使用に関する連絡体制を強化し、各研究室が寒剤供給をより円滑に受けられるよう、また、寒剤をより安全に使用できるよう、一層努めていきたいと考えている。



	名称	役割
液体窒素	使用責任者	・ 本学教職員 ・ 研究室の代表者
	連絡担当者	・ 本学教職員 ・ 研究室で容器に関する担当者
液体ヘリウム	使用責任者	・ 本学教職員 ・ 研究室の代表者
	データ報告担当者	・ 本学教職員 ・ 研究室全体の液体ヘリウム使用について把握できる者
集配場所 He回収設備	寒剤管理連絡担当者	・ 本学教職員 ・ 建物ごとに選任 <small>(センターが委嘱)</small>

表 1. 担当名称の一覧

P-24 Ge(111)基板上 Ge_{1-x}Mn_x 磁性半導体における構造と磁性:

構造的均一性と不均一性の影響

工学系研究科電気系工学専攻 田中・大矢研究室

秋山了太、中根了昌、田中雅明

半導体へのスピン注入・検出電極として、磁性半導体は有望であると見込まれ、現在までに盛んに研究がなされている。IV 族系磁性半導体 Ge_{1-x}Mn_x は Ge(001)基板上への成長が主に行われてきたが、そのいずれもが、アモルファスナノコラムや Mn₅Ge₃ などの析出物などを生じ、Mn の凝集を防ぐことが困難であった。ところが 2010 年に Ge(111)基板上に均一性の高い Ge_{1-x}Mn_x 膜を成長できるということが発表された[i]。そこで、本研究では Mn ドープ濃度をパラメーターとして変化させることで、それが Ge(111)上の Ge_{1-x}Mn_x において構造的、磁気的な均一性、不均一性に与える影響を調べた。

成長試料 Ge_{1-x}Mn_x の x=0.09 と 0.14 (以下 Mn9, 14 %と記述)について断面 TEM を図 1 に示す。Mn9, 14 %の両者ともに基本的にはダイヤモンド構造を保持しており、一部アモルファスになっていることがわかる。Mn9 % の試料では陰影の濃い部分 (Mn リッチな領域) が柱状に生じ、Mn14 % の試料では Mn リッチな領域が更に増えていることがわかる。さらに反射小角散乱では Mn6, 7, 14 %の試料では散乱強度の $q(=4\pi/\lambda \sin \theta)$ 依存

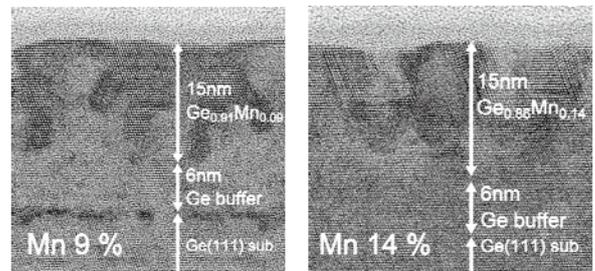


図 1: 断面 TEM 像 (左)Mn 9 %, (右)Mn 14 %試料

性が、散乱強度シミュレーションによってよく再現できた。傾向としては、Mn リッチ領域は Mn9 %に達するまでは球状に分布し、その半径は Mn 濃度と共に大きくなり、球の間隔は小さくなる。Mn 濃度 9 %に達すると成長層の縦方向の長さを満たす柱状になる。さらに Mn 濃度が増えると成長層の上下に Mn 原子が拡散せず柱が太って再び球状近似できるようになると考えられる。

強磁性半導体における強磁性の機構は、Ge_{1-x}Mn_x については Ge(001)上の試料ではパーコレーション磁気ポーラロン(BMP)モデルが実験的に提案されている[ii]。一方で、本研究の材料である Ge(111)上の Ge_{1-x}Mn_xについては未だその磁性について明らかでなかった。まず、X 線、RHEED、反射磁気円二色性(MCD)、磁化、磁気抵抗測定によって強磁性の第二相の析出物はないか、極めて少ないことが分かる。そして MCD 測定から、スピン分裂はそれほど大きくないことが分かり、また抵抗の温度依存性から ~10 K 以下の低温で絶縁体的に転移することから、キャリアが不純物バンドを伝導していることが示唆される。また BMP モデルによって理論的に予測された磁化の温度変化は Mn6, 9 %において理論曲線とよく一致し、理論的に予測されるように抵抗の温度依存性は降温に従って長距離強磁性相転移を境にして活性化エネルギーが減少した。Mn14 %については、磁化の温度依存性は理論曲線と一致しなかったが、これは高い Mn 不均一性による、降温に伴う強磁性秩序の緩慢な転移の存在を示していると考えられる。したがって、Ge(111)上の Ge_{1-x}Mn_xについても BMP モデルで説明できると考えられる。

[i] S. Yada, R. Okazaki, S. Ohya, and M. Tanaka, Appl. Phys. Expr. **3**, 123002 (2010).

[ii] Li, A. P. and Wendelken, J. F. and Shen, J. and Feldman, L. C. and Thompson, J. R. and Weitering, H. H. Phys. Rev. B **72**, 195205 (2005).