

## I 高輝度放射光 X 線を用いた光物性研究

Photophysics using brilliant synchrotron X-ray beam

田中義人・石川 潔・長谷川尊之  
Tanaka, Y., Ishikawa K., Hasegawa, T.

放射光 X 線光源の時間特性と高い強度を利用して、物質の高速光応答の研究を進めている。特に、無機単結晶を対象とした光誘起高速構造ダイナミクスとそれに対応する光物性を明らかにすることを目標としている。手法としては、ピコ秒・フェムト秒の時間分解能をもつ X 線回折法および光電子分光法に加え、近赤外分光法も取り入れている。対象はシリコン、ヒ化ガリウムといった代表的な半導体単結晶の他、磁性体や構造相転移物質である。当該年度では、SPring-8 および SACLA にて時間分解 X 線計測を行い、半導体単結晶における過渡的な光歪効果、光電子分光信号における空間電荷効果、および X 線照射によるバンドギャップ付近の光学特性を調べた。X 線励起近赤外分光では、これまで開発を進めてきた非線形フォトニック結晶ファイバーによるフェムト秒パルス光の広波長帯域化装置を SPring-8 に持ち込み、ヒ化ガリウムに対して測定を行った結果、MHz の高繰り返しでの X 線照射では、試料温度の定常的上昇に起因するバンドギャップ変化が観測された。

## II X 線ファイバー光学系の開発

Development of X-ray fiber optics

田中義人・石川 潔・長谷川尊之  
Tanaka, Y., Ishikawa K., Hasegawa, T.

X 線領域の新しい光学系として、光ファイバーに相当する X 線ビーム伝搬素子、すなわち、X 線ファイバーの開発を進めている。X 線ファイバーが実現すれば、放射光 X 線を、試料上に、所望の位置、角度、タイミングでより簡便に照射して測定できる。これまでに、中空のガラス管に放射光 X 線を通して基礎的なデータを取得し、X 線ビームの方向を変えたり、ビーム軸をシフトさせたり、さらにはビームを迂回させることによる時間遅延制御のデモ実験を行ってきた。また、実用を目指すために、X 線ファイバーの曲率を一定にして制御できる機構を開発し、X 線ファイバーの透過率の曲げ角依存性について定量的に評価した。

### III 核スピン偏極の光生成・移行と緩和

Nuclear spin polarization by means of optical pumping of atomic vapor

石川 潔  
Ishikawa, K.

核磁気共鳴は基礎から応用研究まで広く使われる計測法で、物質について多彩な情報を与える。一方、従来法は感度が低いのが欠点である。レーザー誘起核スピン偏極は、その短所を長所に変える。レーザー光を照射し、物質内の原子核のスピン向きをそろえると、物質が大きな磁気共鳴信号を発生する。非平衡状態の信号なので、注目する相互作用のみを観測することもできる。

我々は、光により気体・液体や固体の核スピンを偏極する汎用的な手法の開発をめざしている。光を吸収する物質だけでなく、吸収しない物質をスピン偏極するため、光によりスピン偏極が容易な原子を介し、光のスピン角運動量を目的物質に移す。光誘起スピン偏極が物質に移る過程、物質内で緩和する過程を詳しく調べ、スピン偏極率を向上させる。

これまでに、気体のアルカリ金属原子と希ガスの混合系の核スピン偏極、偏極希ガス溶液中でスピン緩和機構を調べてきた。加えて、アルカリ金属原子と固体アルカリ塩の系が有望である。

### IV スピン緩和抑制コーティングの NMR 計測

NMR diagnosis and design for anti spin-relaxation coating

石川 潔  
Ishikawa, K.

偏極原子気体は、原子・分子との衝突や壁との衝突により、スピン偏極を失っていく。気体の偏極を長期保存するためには、壁におけるスピン緩和を抑制することが重要である。偏極希ガスの場合、アルカリ金属コーティングが有効である。

ガラス容器内面を金属 Cs や Rb でコートする際、不純物が混入すると伝導電子密度が変化する。薄膜の伝導電子は気体原子に対するポテンシャルを形成し、密度制御は原子を使った精密計測に重要である。一方、伝導電子により NMR 周波数はナイトシフトするので、金属中の不純物を NMR 検出できる。これまで、不純物として酸素とナトリウムを同定した。ガラス容器を壊さずにコーティングを検査できる NMR 計測に加え、金属蒸気密度を光吸収で測定する。これらの特徴を生かし、高性能なコーティングを開発する。

## V 半導体ナノ・マイクロ構造の超高速キャリア輸送

Ultrafast carrier transport in semiconductor nano-micro structures

長谷川尊之・田中義人  
Hasegawa, T., Tanaka, Y.

フェムト秒レーザーで励起された半導体中のキャリアは、フォノンとの相互作用によって複雑な時間発展を示す。本研究では、ナノ・マイクロメートルスケールで構造制御した半導体を対象として、構造特有のサブピコ秒（テラヘルツ）キャリア輸送プロセスを明らかにすること、ならびにその制御の指針を得ることを目的としている。実験は、フェムト秒レーザーを光源とした時間分解ポンプ・プローブ計測およびテラヘルツ電磁波波形計測を主体としている。現在では、主に内蔵電場を有するヒ化ガリウム多層膜構造を対象として、キャリア励起条件とテラヘルツ電磁波放射応答の関連性を調べている。また、テラヘルツ電磁波検出システムの追加整備を行っている。

## VI 半導体ナノ粒子塗布膜の光電流特性

Photocurrent characteristics in semiconductor nanoparticle films

長谷川尊之・田中義人  
Hasegawa, T., Tanaka, Y.

半導体ナノ粒子の溶液を塗布することで形成される薄膜構造では、ナノ粒子の粒径や表面修飾基の制御によって、多様な電子輸送プロセスが発現することが期待される。本研究では、シリコンナノ粒子塗布膜を電極付基板上に作製し、半導体レーザーまたは広帯域ランプ光源を用いた光電流応答の測定から、光励起電子の生成効率および輸送プロセスを調べている。現在では、高い空間・エネルギー分解能の光電流スペクトル計測システムを構築し、塗布膜試料の光電流スペクトルを精密に測定している。

## 発表論文 List of Publications

- I-1** T. Inada, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, K. Tamasaku, Y. Tanaka, Y. Inubushi, K. Sawada, M. Yabashi, T. Ishikawa, A. Matsuo, K. Kawaguchi, K. Kindo, H. Nojiri: **Search for two-photon interaction with axionlike particles using high-repetition pulsed magnets and synchrotron x rays**, Phys. Rev. Lett., **118**, 071803 (2017)
- I-2** T. Yamaji, T. Inada, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, K. Tamasaku, Y. Tanaka, Y. Inubushi, K. Sawada, M. Yabashi, T. Ishikawa: **An experiment of X-ray photon-photon elastic scattering with a Laue-case beam collider**. Phys. Lett., **B763**, 454-457 (2016)
- I-3** L.-P. Oloff, A. Chainani, M. Matsunami, K. Takahashi, T. Togashi, H. Osawa, K. Hanff, A. Quer, R. Matsushita, R. Shiraishi, M. Nagashima, A. Kimura, K. Matsuishi, M. Yabashi, Y. Tanaka, G. Rossi, T. Ishikawa, K. Rossnagel, M. Oura: **Time-resolved HAXPES using a microfocused XFEL beam: From vacuum space-charge effects to intrinsic charge-carrier recombination dynamics**, Sci. Reports, **6**, 35087 (2016)
- I-4** Y. Tanaka, R. Matsushita, R. Shiraishi, T. Hasegawa, K. Ishikawa, K. Sawada, Y. Kohmura, I. Takahashi: **X-Ray Beam Transfer between Hollow Fibers for Long-Distance Transport**, AIP Conf. Proc., 12th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI2015), **1741**, 040029 (2016)
- I-5** A. Chainani, M. Oura, M. Matsunami, A. Ochiai, T. Takahashi, Y. Tanaka, K. Tamasaku, Y. Kohmura, T. Ishikawa: **Electronic structure of LaTe and CeTe**, Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, **208**, 116-120 (2016)
- I-6** 田中義人: シリコン半導体単結晶における高速光歪効果の観測, 第37回極限コヒーレント光科学セミナー (東大物性研究所/SPring-8 2016年5月)
- I-7** Ayato Kimura, Hiroyuki Ohsumi, Yusuke Kousaka, Takayuki Hasegawa, and Yoshihito Tanaka: **Observation of chirality domain in FeSi irradiated by optical vortex**, The 6th Short-term Student Exchange Program, Aug. 25-28, 2016, Dong-A University, Korea
- I-8** 永島麻紀, 白石龍太郎, 田中健太, 吉田桃太郎, 福山祥光, 安田伸広, 長谷川尊之, 田中義人: **放射光 X 線計測における半導体薄膜の近赤外透過スペクトル変化の測定**, 第30回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム (神戸芸術センター 2017年1月)
- I-9** 大隅寛幸, 高阪勇輔, 木村彩人, 長谷川尊之, 田中義人: **円偏光変調法による反転比マッピング測定の高感度化**, 第30回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム (神戸芸術センター 2017年1月)

- I-10** 山道智博, 稲田聡明, 山崎高幸, 難波俊雄, 浅井祥仁, 小林富雄, 玉作賢治, 田中義人, 犬伏雄一, 澤田桂, 矢橋牧名, 石川哲也, 高橋忠幸, 渡辺伸, 佐藤悟朗: **SPring-8/SACLA** における光子光子散乱の探索, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (宮崎大学 2016 年 9 月)
- I-11** 大隅寛幸, 高阪勇輔, 田中義人, 長谷川尊之, 木村彩人: **無機カイラル磁性体  $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$  中のカイラリティドメインの観察**, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学 2016 年 9 月)
- I-12** 白石龍太郎, 上田忠彌, 永島麻紀, 木村彩人, 長谷川尊之, 石川潔, 大浦正樹, 田中義人: **シリコン単結晶における高速光歪効果の観測とその特性**, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学 2016 年 9 月)
- II-1** 田中義人: **中空ファイバーによる放射光 X 線伝送法の開発**, 兵庫県立大学 知の交流シンポジウム 2016, (姫路商工会議所 2016 年 9 月)
- III-1** K. Ishikawa: **Spin-polarized lithium diffusion in a glass hot-vapor cell**, Appl. Phys. B **122**, 224 (2016)
- III-2** 石川 潔, 濱田風沙: **ガラス容器中の熱い Li 蒸気の光ポンピング**, 日本物理学会 2016 年 秋季大会 (金沢大学 2016 年 9 月)
- III-3** 石川 潔: **ガラス容器中の熱い Li 蒸気におけるスピン偏極の拡散**, 日本物理学会 2017 年 第 72 回年次大会 (大阪大学 2017 年 3 月)
- IV-1** B. Patton and K. Ishikawa: **Impurity detection in alkali-metal vapor cells via nuclear magnetic resonance**, J. Appl. Phys. **120**, 174901 (2016)
- IV-2** 黒田崇浩, 関口直太, 石川 潔, 畠山温: **パラフィンコーティングを施したアルカリ金属蒸気セル内で生成されるガスの同定**, 日本物理学会 2017 年 第 72 回年次大会 (大阪大学 2017 年 3 月)
- V-1** T. Hasegawa and M. Nakayama: **Unique characteristics of nonequilibrium carrier transport dynamics in an undoped GaAs/n-type GaAs epitaxial structure**, Applied Physics Express **9**, 071001(4pages) (2016)
- V-2** T. Hasegawa: **Ultrafast optical response originating from nonequilibrium carrier transport in GaAs multiple layer films**, Lab. Seminer, July 25, 2016, Konstanz University, Germany
- V-3** Y. Okushima, T. Hasegawa, and Y. Tanaka: **Quantitative detection of terahertz electromagnetic wave originating from carrier transport in semiconductor submicron structures**, The 6th Short-term Student Exchange Program, August 25-28, 2016, Dong-A University, Korea
- V-4** 奥島雄大, 長谷川尊之, 中山正昭, 田中義人: **GaAs エピタキシャル構造におけるテラヘルツ電磁波放射の励起光エネルギー依存性**, 日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学 2017 年 3 月)

- V-5** 長谷川尊之: 半導体キャリア輸送の超高速レーザー分光, 多重極限物質科学研究センター・高度産業科学技術研究所 合同研究会 (兵庫県立大学 CAST 2016 年 12 月)
- VI-1** 長谷川尊之, 田中一生, 名古屋渉, 佐藤井一: 導電性シリコンナノ粒子塗布膜のサブピコ秒光励起ダイナミクス, 日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学 2017 年 3 月)
- VI-2** 名古屋 渉, 田中 一生, 森木 和也, 尾崎 神太郎, 長谷川 尊之, 田中 義人, 田島 裕之, 佐藤 井一: シリコンナノコロイドから作製した導電性シリコンナノ構造膜, 第 67 回コロイドおよび界面化学討論会 (北海道教育大学 2016 年 9 月) P132

## 大学院物質理学研究科

### 博士前期課程

- 白石龍太郎 : 半導体単結晶における高速光歪効果の観測  
 木村彩人 : 光渦ビームを用いた物質構造の光誘起制御  
 永島麻紀 : 半導体における X 線励起分光計測  
 奥島雄大 : テラヘルツ波を用いた半導体物性研究  
 上田忠彌 : 放射光時間分解光電子分光計測

## 科学研究費補助金等

- 1 ひょうご科学技術協会学術研究助成 (平成 28 年度)  
 研究課題 X 線励起による過渡的物性変化の分光学的研究  
 研究代表者 田中義人
- 2 日本学術振興会 科学研究費補助金 (平成 28-30 年度) 基盤研究 (B)  
 課題番号 16H04030  
 研究課題 気体原子スピン状態を凝縮系へ移す: 超偏極セパレータの開発  
 研究代表者 石川 潔
- 3 松尾学術振興財団 松尾学術研究助成 (平成 28-29 年度)  
 研究課題 ガラス容器の熱い金属蒸気の光ポンピングとスピン角運動量の出力  
 研究代表者 石川 潔
- 4 村田学術振興財団・研究者海外派遣 (平成 28 年度)  
 課題番号 H28 海自 60  
 研究課題 先端レーザー・テラヘルツ技術を駆使した超高速ダイナミクスに関する研究  
 研究代表者 長谷川尊之
- 5 兵庫県立大学特別研究助成金 (平成 28 年度)  
 研究課題 ナノメータ制御半導体薄膜をもちいたサブピコ秒電子輸送の制御  
 研究代表者 長谷川尊之