BL11XU 極限量子ダイナミクス I

1. 概要

BL11XUは真空封止型アンジュレータを光源とした量 子科学技術研究開発機構の専用ビームラインである。光 学ハッチ内にSi (111)結晶とSi (311)結晶を真空中で 切り替え利用できる液体窒素冷却式の二結晶分光器が設 置されており、6 keVから70 keV領域の放射光を高出 力で利用できる。さらに、集光と高調波カット用の横置 き型X線ミラーに加え、複数のBe屈折レンズを切り替 え利用できるX線光学機器も整備されている。実験ハッ チには、放射光メスバウアー分光、X線吸収分析装置、 非弾性X線散乱および表面X線回折計測用の測定装置 類が整備されており、これらを用いた専用ビームライン 独自の先端放射光利用技術開発と量子機能材料研究への 応用が展開されている。

バンド幅可変・核モノクロメーターの開発と超高分 解能X線非弾性散乱への応用

実験ハッチ1上流側では、先進的放射光メスバウアー 分光装置の開発と機能材料研究への応用を展開してい る。2017年度は、放射光メスバウアー分光を利用した ナノ材料研究や超高圧水素下での希土類水素化物の電子 物性を調べる応用研究が行われた。これに加えて、放射 光核共鳴散乱の超単色性を活かした新しい利用研究の可 能性を探るための放射光超単色化技術の高度化を進め た。その特筆すべき開発成果の一つとして、⁵⁷Fe核モノ クロメーターで生成した放射光メスバウアー y 線のバン ド幅制御技術の実用化に成功したので紹介する^[1]。

これまでの放射光超単色化では、連続波長の放射光を Néel点近傍で内部磁場が殆ど零に近い状態の⁵⁷FeBO₃単 結晶に照射して、この結晶の電子散乱禁制で核共鳴散乱 が許容となる純核ブラッグ反射を利用することでメスバ ウアー分光に利用できるバンド幅10⁻⁸程度の⁵⁷Feメス バウアー y線を発生させている^[2]。ところで、Néel点 よりも低い温度では内部磁場が存在するため、核の超微 細構造は、核ゼーマン分裂により不連続なエネルギー分 布を持つ。このため、 Δ m=±1の4本のマルチライン のメスバウアー y線が分光され、そのバンド幅は室温で 約0.8 μ eVに広がり、 y線強度はNéel点近傍(~76℃) で得られる y線に比べて1桁大きくなる。ところが、マ ルチライン y線は、分光実験を行うプローブとして使い にくく、これまでのところ、精密 y線光学研究以外の応 用には供されたことがなかった。そこで、我々は分光結 晶の温度制御で⁵⁷Fe核の内部磁場の大きさ(全体の分裂 幅)の調節を行うと同時に、結晶に高周波磁場を印可し て磁気弾性的に中の⁵⁷Fe原子核を振動させ、超微細構造 分裂の不連続なエネルギー分布をコラップス効果で連続 的なものに変換することにより、10⁻⁶~10⁻⁸ eV領域で バンド幅を制御したシングルラインメスバウアーγ線を 高出力で生成することを試みた。

核モノクロメーターのバンド幅制御とそのエネルギー 分布を評価できる光学系を図1(a)に示す。本光学系



(a) 光学系(b) 結晶の温度と印加する高周波磁場強度に対するバンド幅変化

では、放射光から高分解能分光器 [Si511 x Si975] で分 光したσ 偏光の X 線 (14.4 keV) を⁵⁷FeBO₃結晶に照射 し、それを結晶の電子散乱が禁制で核共鳴散乱が許容と なる回折面で反射させる(純核ブラッグ反射)。この時、 結晶温度は0.01℃以下の精度で制御し、容易磁化面(111) 内で散乱面に対して垂直に8 MHzの高周波磁場を印加 する。この時、結晶には磁気弾性波が共鳴励起され、不 均一な振幅の膜面振動が生じる^[3]。その結果、⁵⁷Fe核か ら出射される y 線にランダム位相変調(ドップラー効 果)が起こり、不連続な超微細構造分裂が連続的なエネ ルギー分布へ変化する(高周波コラップス効果)^[4]。そ のエネルギー分布の変化は、核モノクロメーターの下 流に配置したシングルラインの吸収特性(バンド幅=23 neV)を有するステンレス箔を振動させ、メスバウアー 吸収スペクトルを測定することで評価される。結晶温度 と印加する高周波磁場強度を変えた時のスペクトルを図 1(b)に示す。一見して分かるように、温度と磁場強 度を調節することで、10⁻⁶~10⁻⁸ eVのバンド幅で連続 的なエネルギー分布を有するシングルラインの放射光メ スバウアーγ線を発生できることが分かる。この時、バ ンド幅増加に伴い、γ線の強度が約1桁向上することも 確認された。この様に、10⁻⁶~10⁻⁸ eV領域でバンド幅 可変のシングルラインメスバウアーγ線を発生する技術 はこれまで存在しなかったもので新しい計測技術への応



図2 液体グリセロールの準弾性散乱

用が期待できる。

バンド幅が広く、高出力の放射光メスバウアー y 線を 用いた新しい計測法の一例として、液体状態のグリセ ロールの準弾性散乱の測定を試みた。ここで、液体状態 のグリセロールの分子の拡散運動は激しく、高分解能中 性子準弾性散乱実験から、線幅が1 μeV 程度まで広がる ことが指摘されている。さらに、液体試料では、無反跳 分率が極端に低く、従来の10⁻⁸ eVバンド幅のメスバウ アー y 線源では強度不足で測定ができない。

実験配置を図2(a)に示す。本実験では分光結晶の 温度を室温に固定し、振幅0.75 Oe、周波数8 MHzの高 周波磁場を結晶に印加することで、バンド幅1μeVの放 射光メスバウアー y 線を発生させる。それを、クライオ スタット内のグリセロールに照射して、ガラス転移温 度より低温側の-123℃と融点より高温側の25℃の温度 で準弾性散乱スペクトルを測定した。検出器は角散乱 が約12°の位置に配置して測定を行った。エネルギーア ナライザーとして、バンド幅50 neVのシングルライン 核共鳴吸収体(BA)を検出器の直前に配置し、それを ドップラー振動させ、吸収スペクトルを測ることで準弾 性散乱のプロファイルを得た。また、実験の前に、試料 が無い状態で検出器を前方に配置して吸収スペクトルを 測定する事で装置関数を測定した。これらの結果を図2 (b) に示す。一見で、低温側で測定した準弾性散乱プ ロファイルが装置関数と同じであることが分かる。この 結果は、ガラス転移以下のグリセリンでは入射 y 線のバ ンド幅(分解能~1 µeV)に対して観測にかからないほ ど分子振動が小さいことを意味している。一方、室温で 観測したスペクトルは、装置関数に比べて2倍程度まで 広がっていることが分かる。これは、液体状態のグリセ リンでは、分子の振動状態が大きく増加していることを 示唆している。観測されたグリセリンの準弾性散乱の線 幅の広がりは約1 µeVで、中性子散乱などで観測された 値とほぼ一致した。本結果は、バンド幅可変核モノクロ メーターが、これまで測定困難とされていた液体状態の ダイナミクスをµeV分解能で解析できることを初めて 実証したもので、核モノクロメーターの線幅と強度を調 節すれば物質のダイナミクスを10⁻⁸~10⁻⁶ eV領域の超 高分解X線非弾性散乱で調べられることを示唆してい る。高輝度放射光でスローダイナミクス研究を行うこと の利点としては、微小試料や不均一性や異方性のある試 料のダイナミクス研究での優位性があげられる。高指向 性ビームの利用が重要となる回折を用いた実験などには 特に有効な手法になるであろう。例えば、誘電体結晶の 相転移に伴うソフトフォノンの研究は興味深い^[5]。放射 光を極限的に超単色化した放射光メスバウアーy線は、 試料ダメージの無い超マイルドなプローブ光であること

から、機能性高分子薄膜や放射ダメージを受けやすい生 体高分子ダイナミクスの研究にも応用されることが期待 される。

(三井 隆也)

3. XAFSによるアクチノイドなど重元素錯体の構造お よび電子状態解析

実験ハッチ1下流側では、溶液や様々なダイナミ クスな環境におけるイオンの挙動および存在状態を、 SPring-8のアンジュレータ高輝度放射光を用いたXAFS 法により明らかにし、アクチノイド(An)など重元素 の化学結合および錯体構造特性を明らかにしてきた。未 だ十分に体系化されていない重元素錯体化学の理論体系 を解明すると共に、放射性廃棄物の処理法および除染法 の開発、地層処分システムの安全評価の信頼性向上に資 する研究を進めている。

3-1 テトラセレナイド (Se₄²⁻) の吸収スペクトルの取得 地層処分されたガラス固化体から漏れ出した放射性核 種に由来する地表での線量を地層処分に先立って評価 し、地表線量が安全基準を下回ることをあらかじめ確認 しておかなければならない。この地表線量は、半減期が 長く、地下水中を移行しやすいセレン (Se)-79により 支配されると考えられている。そのため、地層処分シス テムの安全性を評価するにあたり、Seの地下水中での 移行挙動を把握することが重要になる。地下300メート ル以深に構築される処分場では、地下水は本来弱アル カリ性且つ強還元性である。このような地下水中では、 Seは主にHSe⁻として溶存すると考えられる。しかしな がら、バリア材に含まれるセメントの影響でpHが上昇 したり、酸化性地下水の流入や地下水の放射線分解に起 因する過酸化水素により処分場環境の酸化還元電位が上 昇すると、Seは主にSe4²⁻として溶存すると考えられる。 そのため、このSe4²⁻の電子構造や収着挙動等を明らか にし、Se4²⁻の地下水を介する移行挙動を評価する必要 がある。そこで、2017年度は、Se42-の電子構造の解明 に資するSe42-の吸収スペクトルを取得することを目的 としてXAFS分析を実施した。

Se₄²⁻は大気中の酸素と反応するとSe単体固相となっ て沈殿するため、SeがSe₄²⁻として高濃度で溶存する 溶液の調製は、低酸素濃度雰囲気で実施する必要があ る。そこで、酸素濃度が0.1%未満に維持された雰囲気 制御グローブボックス内で、SeがSe₄²⁻として高濃度で 溶存する溶液を調製した。この溶液をXAFS分析する 際には、Se₄²⁻が大気中の酸素と反応し沈殿してしまう ことを回避する必要がある。そこで、XAFS測定対象 のSe₄²⁻溶液を酸素吸収剤とともに酸素低透過性フィル



図3 種々のSe化学種の吸収スペクトル

ムからなる袋に雰囲気制御グローブボックス内で封入・ 密封した。この袋の中では酸素濃度が0.1%未満に維持 された。この袋に封入したまま、BL11XUにおいて、 XAFS分析(SeのK吸収端測定)を実施した。

図3にこれまでにBL11XUで取得した種々のSe化学 種のXANESスペクトル (Se K吸収端近傍を規格化し たもの)をまとめた。Se₄²⁻のXANESスペクトルは、 二つのピークを有することが確認され、Se₄²⁻を構成す るSeは2種類の酸化数を有することが示唆された。

3-2 ガラス固化体の溶解速度評価に資するFe(Ⅱ)-Si 固相のXAFS分析

鉄(Fe)とケイ素(Si)の相互作用は、Fe-ケイ酸塩 およびSiを含有するFe(水)酸化物の生成を通じて、 地層処分されたガラス固化体の溶解速度に影響すると考 えられている。これらの相の前駆物質は、相互作用の初 期段階で生成した結晶性の乏しいFe-Si析出物である。 長時間が経過した後に形成される安定相を予測するため には、Fe-Siの前駆相の特性および構造の詳細な理解が 必要である。本試験では、低酸素・還元環境において種々 のSi/Fe(II)比でFe(II)-Si固相を合成した。Fe(II) -Si固相のXAFS分析を行うことで、Si存在下における Fe(II)の局所的な定量的情報を得ることが可能である。 特に、本試験では、Siの増加に伴うFe(II)の酸素配位 数の変化およびFe(II)の重合度(Fe-Fe結合の数)に 着目している。

Fe (II)-Siの粉末は、低酸素濃度雰囲気としたグロー ブボックス内において、Fe (II)-Siのペーストを低湿度 で乾燥させることで調製した。乾燥試料は、粉末化後に 透明な熱圧着ビニルバッグに封入した。粉末試料の酸化



図4 pH 11において種々のSi/Fe(Ⅱ)比で合成した試料の EXAFS スペクトルのフーリエ変換結果

を防ぐため、酸素吸収剤を試料とともに封入し、Feの K吸収端の測定を行った。

図4は、pH 11において種々のSi/Fe(II)比(Si/Fe(II) = 0.5, 1.0, 2.0) で合成した試料のEXAFSスペクトルから得られた動径構造関数である。フーリエ変換マグニ チュードから判断すると、2つの配位シェルが確認できる。ARTEMISを用いたFEFFによる予備計算では、第 1シェル(R = 1-2 Å)は、5-6個のO原子に相当する。 パラメータが不規則となっているのは、原子間距離が大きくばらついていることを示唆しており、Si/Fe(II) = 0.5で最も顕著である。第2シェル(R = 2-3 Å)は、6 個のFe原子に相当する。

(塩飽 秀啓、小林 徹、土井 玲祐、Paul Clarence Francisco)

4. 共鳴非弾性X線散乱法による遷移金属化合物の電子 励起状態の研究

実験ハッチ2では非弾性散乱分光器を設置し、硬X線 領域にある3d遷移金属のK吸収端、5d遷移金属のL吸 収端を用いた共鳴非弾性X線散乱(RIXS)、X線発光分 光、高エネルギー分解能蛍光検出による高分解能X線吸 収分光の測定を行っている。測定対象は、強相関電子系 物質や触媒、電池の電極材料などの遷移金属化合物で ある。強相関電子系物質ではRIXSによって電子励起ス ペクトルを観測することで、電子状態を明らかにするこ とを目的としている。一方、触媒や電極材料では硬X線 の持つ高い透過能を活かして材料の動作環境下での電子 状態をX線発光分光や高分解能X線吸収分光などにより その場観測し、機能発現メカニズムの解明を目指してい る。

2017年度に行ったRIXSによる研究として電子ドープ 型銅酸化物超伝導体を取り上げる。いわゆるT^{*}構造を 持つ電子ドープ型銅酸化物超伝導体R_{2-x}Ce_xCuO₄(R: rare earth)においては、従来、+3価のRを+4価のCe に置換することによる電子ドープに加え、結晶の還元ア ニール処理による過剰酸素の除去が超伝導の発現には不



図5 Nd₂CuO₄の銅K吸収端RIXSスペクトル。qはCuO₂面内 の運動量を表す。

可欠とされてきた。最近、新たな還元処理方法や試料合 成方法の導入により、従来考えられていたよりも低い Ce濃度(x)まで、場合によってはCe置換を行ってい ない試料でも超伝導が報告された。特に、Ce置換を行っ ていない試料での超伝導発現は母物質がモット絶縁体で ない可能性を示すものであり、還元アニール処理が電子 状態にどのような影響を与えているかを再検討する必要 がある。本研究では、銅K吸収端のRIXSを用い、電荷 励起の観点から還元アニールの電子状態への影響を調べ ことで、電子ドープ型銅酸化物での還元アニール処理が 本質的に何を起こしているかを明らかにすることを目指 した。

実験はBL11XU実験ハッチ2の非弾性X線散乱分光器 を用いて行い、チャンネルカットSi (400) モノクロメー ター、Ge (733) アナライザーの組合せでエネルギー分 解能は約270 meVであった。入射X線のエネルギーは、 過去の実験で詳細な運動量依存性を測定した時と同じ 8991 eVとした。

図5にCe置換をおこなっていない母物質Nd₂CuO₄の 結果を示す。as-grown試料では、すべての運動量で1eV 付近のスペクトル強度が消失し、バンドギャップが観測 されているのに対し、annealed試料ではq = (0,0) を除 いてギャップ内の強度が増大している。この変化はCe 置換により電子ドープしたときのスペクトル変化と同じ であり、還元アニール処理により電子がドープされてい ることを示す。従って、Ce置換をしていない試料にお いても、還元アニール処理によって電子がドープでき、 金属、さらには超伝導体になる可能性があるといえる。

X線発光分光では、鉄系超伝導体の鉄K・β線の測定 から鉄3d電子スピンの状態を調べた^[6]。鉄のKβ線分光 では、低エネルギー側のKβ[']線と高エネルギー側のK $\beta_{1,3}$ 線との分裂の大きさが3dスピンの大きさに比例するこ とが知られている。母物質BaFe₂As₂、およびそれに対 してホールをドープしたBa_{1-x}K_xFe₂As₂、電子をドープ したBa_{1-x}K_xFe₂As₂について系統的にドーピング依存 性の測定を行い、ホールドープについてはスピンの大き さがほとんど変わらないのに対し、電子ドープを行うと スピンが小さくなることが分かった。このドーピングに 対して非対称な結果は、フント結合によって3d電子が5 個の状態が長寿命で安定化するというスピン凍結状態を 考えることで理解することができる。

高エネルギー分解能蛍光検出による高分解能X線吸収 分光では、固体高分子型燃料電池Pt、PtCo触媒表面の 酸素吸着に及ぼす水の影響を調べ、Ptでは水酸素の共 吸着が反応を抑制しているに対し、PtCoではその抑制 がなくなっていることを明らかにした^[7]。この研究は文 部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業として 行われ、約3000件の利用課題の中から6件選ばれた「秀 でた利用成果」の一つに選ばれた。また、同手法を用い て、EXAFSにおいてしばしば解析の妨げとなる隣接吸 収端の影響が除去できる事を示す成果を得た^[8]。

(石井 賢司)

5. 表面X線回折計を用いたMBE結晶成長中のその場観察

BL11XUの実験ハッチ3には、半導体結晶成長過程の 動的測定を目的とした分子線エピタキシャル(MBE) 装置とX線回折計とを組み合わせた装置が設置されて いる^[9-11]。2014年度からは、プラズマ支援窒化物半導 体MBE装置が新規に導入され、ヒ素化合物やアンチモ ン化合物に加え、AINやGaN, InNを含む広範な材料に ついて、結晶成長中のその場放射光X線回折測定ができ るようになった。窒化物半導体用の真空チェンバーは、 蒸気圧の高いヒ素が使用されていないことから、窒化物 半導体の結晶成長に関する実験だけでなく、10⁻⁸Pa台 の超高真空を必要とする実験に広く利用されている。2 台のMBE装置は、1台のX線回折計に対し、半年から1 年の間隔で載せ替えが行われている。それぞれのMBE 装置は、X線回折計に載せられていない期間も、オフラ インで使用することができ、放射光実験に備えた試料作 製の予備実験に用いることが可能である。2017年度は、 4月から12月まで窒化物半導体MBE、1月から3月まで ヒ化物半導体MBEに関する実験が進められた。

窒化物半導体成長装置については、結晶成長速度を増 加させるための改良を行った。GaNやAIN、InNなどの 窒化物半導体は、通常、III族分子線が窒素ラジカルよ りも多い条件で成長が行われる。このような場合、結晶 の成長速度は窒素の供給量で律速されるため、成長速度 の増加のためには窒素ラジカルを増やすことが必要にな る。そこで、窒素ラジカルセルのノズル先端部に開けら れている開口の数を従来126個から190個に増やす改造 を行った。図6は改造後に成長したSiC(0001) 基板上 のGaN膜断面のSEM像である。成長時間は62分14秒 であった。これより、GaNの成長速度は100-120 nm/h と見積もられ、従来に比べ、およそ1.5倍の成長速度に なっていることが確かめられた。窒素ラジカル量を増や したことにより、窒素過剰条件で成長させるGaNナノ ワイヤの成長も容易になった(図7)。そのほか、マグ ネシウム用のクヌーセンセルを追加したことにより、p 型ドープもできるようになった。

ヒ化物半導体については、GaAs (001) 基板上の InGaAs成長を対象に、格子不整合度の違いが格子不 整合ひずみの緩和様式に及ぼす影響が調べられた。 InGaAs/GaAs (001) の系では、Inの組成が30%程度以 下のときにはInGaAs膜が二次元成長し、膜中に蓄積さ れたひずみは貫通転移を形成することで緩和される。一 方、In組成がそれより大きい領域では、InGaAsが島状 成長することによってひずみ緩和が進む。基板表面に水 平および垂直な方向の格子定数を一度に決められる三 次元X線逆格子マップのその場測定を行うことによっ て、成長中のInGaAsのひずみ緩和率および組成の変化 を決定した^[12]。InGaAs膜の転位の挙動は、成長基板の 格子面と物理表面との傾きにも影響される。成長中のX 線逆格子マップの結果から、[110] 方向に6度傾斜した 基板では、転位の発生に顕著な非等方性が見られたのに 対し、[1-10] 方向に6度傾斜した基板では、そのような 非等方性はみられなかった。このことから、基板の傾斜 をうまく利用すれば、InGaAs膜の格子緩和の挙動を制 御できる可能性が示された^[13]。また、InGaAsを膜とし てではなく、ナノワイヤとして成長させることで、量子 効果の利用など新しいデバイスの応用可能性が期待され る。このような関心から、従来進めてきた金を触媒とし て用いるGaAsナノワイヤ成長の研究^[14]をさらに進め、 InGaAsナノワイヤの成長のようすを調べた^[15]。

窒化物半導体を含むIII-V族化合物半導体の結晶成長 過程をその場X線回折測定できる装置は、世界的に見 ても独自性の高い存在であり、文部科学省ナノテクノロ



 図6 BL11XUに設置されたその場X線回折用窒化物半導体成 長装置を用いてSiC(0001)基板上に成長させたGaN 膜断面のSEM像(成長時間は62分14秒。GaNの成長 速度は100-120 nm/hと見積もられる。

ジープラットフォーム事業の一端を担うため、ビームタ イムの一部が国内外の外部ユーザーに対し共用に付され ている。2017A・B期を通じて、窒化物光デバイスの長 波長化に向けたその場X線回折測定を用いたGaInN分 子線エピタキシー成長におけるひずみ緩和過程の制御技 術構築や、サファイア基板・(AlGa)₂O₃基板の表面窒化、 放射光X線を用いた格子不整合III-V族化合物半導体混 晶のリアルタイム構造解析など、のべ6課題が実施され た。

(高橋 正光)

6. 非共鳴磁気 X 線回折を用いた磁区観察法の開発

永久磁石や電磁鋼板など磁性体の内部の磁区構造を観 察したいという要望は以前から存在したが、意外に適当 な測定方法が存在しない。そこで、BL11XUでは、集光 性に優れ微小領域測定に適した放射光を用い、加えて 侵入長の長い高エネルギー X線を利用することにより、 磁性体内部の磁区構造の観測が可能な新しい顕微磁気測 定法の開発を試みている。最終的な目標は、1 µm 程度 の空間分解能と100 µm 程度の侵入深さである。測定手 法としては、強磁性観測手法として確立している非共鳴 磁気X線回折法を用いた。強磁性体から散乱角90度で 回折されたX線強度が入射楕円偏光の左右に依存する 現象を利用している。鍵となる光学素子は直線偏光子で あり、この導入により入射偏光純度を1-2桁向上させ、 実用的な大きさの反転比と汎用ダイヤモンド移相子を用 いた高エネルギーX線の偏光制御を実現させるのが重 要な開発要素である。

ここまでの研究では、Si (nn0) 直線偏光子を利用し た8.7 keVと17.3 keVでの反転比の測定、また、集光光 学系の導入による17.3 keVでの磁気ドメインの走査顕 微観察まで実施できた。2017A期は、直線偏光度の向 上を目指し、Si (nnn) 直線偏光子を試したものの、目 標とする26 keVでの反転比の観察には至らなかった。 2017B期はさらなる直線偏光度の向上を目指し、Si (n00) 直線偏光子の利用を試みた。



図7 BL11XUに設置されたその場X線回折用窒化物半導体成 長装置を用いてSi(111) 基板上に成長させたGaNナノ ワイヤ。成長時間は4時間。

挿入光源からの光はモノクロメーターで単色化した 後、直線偏光度を上げるために直線偏光子を通し、続い て、楕円偏光にするために移相子を通す。直線偏光子は Si (n00) チャンネルカット結晶で、移相子は厚さ500 μm、(100)研磨面のダイヤモンド単結晶である。試料 は鉄の単結晶で、110面が出ている。必要に応じ永久磁 石ではさみ、磁化を飽和させる。散乱角が90度になる ように観察する指数とエネルギーを選び、Si(800) -Fe (330) - 13 keVでまず実験を開始し、続いて、Si (16 00) - Fe (660) - 26 keVの組み合わせで行った。試料 位置でのビームサイズは、0.5 mm×0.5 mm程度で行っ た。結果としては、まず、13 keVで約1%の反転比を観 測し、続いて26 keVで約0.5%の反転比の観測に成功し た。計算と比べると、13 keVの直線偏光度は0.99997程 度、26 keVの直線偏光度は0.99992程度となり、直線偏 光度があまり上がっていないことが分かった。今後は、 26 keV での偏光純度の向上を目指すことになる。

(稲見 俊哉)

参考文献

- [1] T. Mitsui, R. Masuda, M. Seto and N. Hirao, J. Phys. Soc. Jpn. (2018) [accepted].
- [2] T. Mitsui, N. Hirao, Y. Ohishi, R. Masuda, Y. Nakamura, H. Enoki, K. Sakaki, and M. Seto, J. Synchrotron Radiat. 16, 723 (2009).
- [3] T. Mitsui, Y. Imai, and S. Kikuta, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 199,75 (2003).
- [4] Yu.V. Shvyd'ko, T. Hertrich, V. E. Sedov, G. V. Smirnov, U. van Bürck, R. L Mössbauer, and A. I. Chumakov, *Europhys. Lett.* **19**, 723 (1992).
- [5] J. Z. Tischler, B. C. Larson, L. A. Boatner, E. E. Alp, and T. Mooney, J. Appl. Phys. 79, 3686 (1996).
- [6] Jonathan Pelliciari, Yaobo Huang, Kenji Ishii, Chenglin Zhang, Pengcheng Dai, Gen Fu Chen, Lingyi Xing, Xiancheng Wang, Changqing Jin, Hong Ding, Philipp Werner, and Thorsten Schmitt, Sci.

Rep. 7, 8003 (2017).

- [7] Yi-Tao Cui, Yoshihisa Harada, HideharuNiwa, Tatsuya Hatanaka, Naoki Nakamura, Masaki Ando, Toyohiko Yoshida, Kenji Ishii, Daiju Matsumura, Hiroshi Oji, Hironori Ofuchi, MasaharuOshima, *Sci. Rep.* 7, 1482 (2017).
- [8] Hiroyuki Asakura, Naomi Kawamura, MasaichiroMizumaki, Kiyofumi Nitta, Kenji Ishii, Saburo Hosokawa, KentaroTeramura, and Tsunehiro Tanaka, J. Anal. At. Spectrom. 33, 84-89 (2018).
- [9] M. Takahasi, Y. Yoneda, H. Inoue, N. Yamamoto and J. Mizuki, Jpn. J. Appl. Phys. 41, 6247 (2002).
- [10] M. Takahasi, J. Phys. Soc. Jpn. 82, 021011 (2013).
- [11] T. Sasaki, F. Ishikawa, T. Yamaguchi and M. Takahasi, Jpn. J. Appl. Phys. 55, 05FB05 (2016).
- [12] R. Deki, T. Sasaki and M. Takahasi, J. Cryst. Growth 468, 241 (2017).
- [13] H. Suzuki, T. Sasaki, M. Takahasi, Y. Ohshita, N. Kojima, I. Kamiya, A. Fukuyama, T. Ikari and M. Yamaguchi, *Jpn. J. Appl. Phys.* 56, 08MA06 (2017).
- [14] M. Takahasi, M. Kozu, T. Sasaki and W. Hu, Cryst. Growth Des., 15, 4979 (2015).
- [15] T. Sasaki and M. Takahasi, J. Cryst. Growth 468, 135 (2017).

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学研究部門 関西光科学研究所 放射光科学研究センター 磁性科学研究グループ 稲見 俊哉、三井 隆也、石井 賢司

コヒーレントX線利用研究グループ

高橋 正光

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 物質科学研究センター 放射光エネルギー材料研究ディビジョン アクチノイド化学研究グループ 塩飽 秀啓、小林 徹、土井 玲祐 Paul Clarence Francisco