BL11XU QST 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。更に、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。

2. 放射光メスバウアー回折による結晶サイト選択的 スペクトルの測定

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。 2016年度は、放射光メスバウアー回折による単結晶試料 の局所磁気構造解析法の開発、研究を精力的に進めた。

メスバウアー分光で測定の対象となる元素は約45種類 にのぼるが、物理、化学、生物から地球科学等に至る多く の分野で取り上げられる鉄(⁵⁷Fe)のメスバウアー分光が 良く知られており、鉄系化合物の電子状態や磁性の研究 に有効利用されている。通常、57Feメスバウアー分光は ⁵⁷Co密封y線源を用いた透過法で行われ、スペクトル解 析からアイソマーシフト、四重極分裂、内部磁場といった 原子核の超微細構造が決定され、鉄の電子状態、磁気構造、 原子配列や格子振動状態に関する情報が得られる。とこ ろで、メスバウアー分光で測定する鉄系化合物には結晶 学的に複数の鉄サイトを持つことがしばしばある。この様 な場合、透過法で測定したスペクトルでは、各サイトの鉄 に起因した成分が重なり合うため、複雑化して解析が困難 となる。一方、X線や中性子の回折実験では、原子位置と 反射指数から成る構造因子により回折強度が決まるため、 回折線の強度を詳細に調べることで、結晶サイトごと、イ オン種ごとの情報を分離して取り出すことができる。この 様な回折法をメスバウアー分光に適用しようとすると、高 輝度メスバウアー線源が必要不可欠となるが、最近、我々 はBL11XUにおいて、市販で最も強い⁵⁷Co線源 (~100

mCi)と比較して10万倍以上も高輝度な⁵⁷Fe放射光メス バウアー線源の開発に成功しており、実用的なメスバウア ー回折の測定環境を利用できる状況にある^[1,2]。そこで、 本研究では、高輝度放射光メスバウアーy線により、回折 分光法を高度化して、結晶サイトを選択して超微細構造 パラメーターを決定できる新手法の開発を行った^[3]。最 初のモデル実験では、典型的なFe複サイト化合物である マグネタイト(Fe₃O₄)の高温相の結晶サイト選択的スペ クトルを測定した。

マグネタイト (Fe₃O₄) は、立方晶逆スピネル型構造 (空間群Fd m) を持ち、結晶学的に異なる2つのFeサイトを 有する。Aサイト (8a) はFe³⁺が、Bサイト (16d) は同 数のFe²⁺ とFe³⁺が占有しており、室温のBサイトFe は、 電子拡散によりFe^{2.5+} として観測される。図1に結晶構造 を示す。サイトの対称性が異なるため、結晶構造因子がA サイトのみ、逆にBサイトのみから成る反射が幾つか存在 する。典型的な反射指数、ブラッグ角 (θ_B)、Aサイト、 Bサイトの構造因子を表1に示す。ところで、メスバウア



図1 Fe₃O₄の結晶構造とサイト選択的メスバウアー回折の概念
 A、B、OはAサイト鉄、Bサイト鉄、酸素を表す。

表1 Fe₃O₄の反射指数、ブラッグ角、A及びBサイトの構造因子。 f_{Fe}は、Feの原子散乱因子を表す。

反射指数	ブラッグ角 θ (°)	A サイト構造因子	B サイト構造因子
220	8.35	$8f_{\rm Fe}$	0
222	10.24	0	$-16 i f_{\rm Fe}$
666	32.26	0	16 $if_{\rm Fe}$
10 10 0	46.48	$8f_{\rm Fe}$	0

されず、一般的なローレンツ関数で良くフィットできる。 666反射と10100反射の回折スペクトルの解析で求め たA、Bサイトの超微細パラメーターは、密封線源を用い た従来の測定で得られる値と同等の値であった。以上の結 果より、θ_B-45°の回折面(45°法)を用いた結晶のサイ ト選択的なメスバウアースペクトルの観測に初めて成功し た。本成果を取りまとめた論文は、JPSJの注目論文として





図2 メスバウアー回折装置の光学系(上)と外観写真(下) hは光の単位磁場ベクトル(添え字は偏光状態を示す)、 H_{ex}は外部磁場、Nalはカウンターを表す。



図3 45度法による⁵⁷Fe₃O₄のサイト選択的メスバウアー回折 スペクトル(上)666反射(下)10100反射。上図で、(n)、 (e)はそれぞれ、核共鳴散乱、電子散乱に起因する。

ー回折法で結晶サイトを選択してスペクトルを観測するに は、電子散乱(X線)を抑制し、表1の構造因子に対応す る回折に寄与した核共鳴散乱(y線)の発光スペクトルの みを取り出す必要がある。その一つの方法として、電子散 乱と核共鳴散乱の偏光因子の散乱角依存性の違いを利用 できる。これは、π 偏光入射した γ 線に対する電子散乱の 偏光因子が $\cos 2\theta_{\rm B}$ であることから、 $\theta_{\rm B}$ が45°近辺の回 折面では電子散乱は抑制されるが、核共鳴散乱の偏光因子 は、θ_Bが45°の回折面でも、内部磁場の向きを選ぶこと で偏光因子が有限値を持ち、核共鳴散乱のみの発光スペク トルを観測できるという原理に基づいている。表1から分 かるように666反射 (θ_{B} = 32.26°) と10100反射 (θ_{B} = 46.48°) は、ブラッグ角が45°に近く、結晶構造因子が、 それぞれ、Bサイト、Aサイトのみ値を持つため、サイト 選択したメスバウアースペクトルの観測に適している。図 1には、Aサイト、Bサイトで選択的に起こるメスバウア ー回折の概念を示す。今回の実験では、酸素雰囲気制御中 で集光式浮遊帯溶融法(FZ法)で合成した⁵⁷Feを95%富 化した⁵⁷Fe₃O₄単結晶を試料に用いた。図2には、放射光 メスバウアー回折実験の光学系と装置の外観写真を示す。 本装置に装備した核分光器 [57FeBO3(111)] を用いれば、 バンド幅15.4 neVの100%直線偏光(π偏光)した14.4 keVの放射光メスバウアーy線[ビームサイズは横1.6 mm×縦0.4 mm、縦方向の発散角は3秒角]を用いた回折 配置での実験を容易に実施できる。試料ステージには、θ -20回折計(チルト機能付)を利用しており、結晶試料か らの回折 y 線を高角度分解能(Δω = 0.36 秒角)で測定で きる。図2の光学系において、核分光器をドップラー振動 させることでメスバウアースペクトルを観測することがで きる。室温において観測した666反射のメスバウアー回折 スペクトルを図3(上)に示す。表1から予想されたように、 電子散乱の大部分は抑制され、核共鳴散乱が支配的な発光 スペクトルが観測されている。しかしながら、666反射では、 電子散乱の偏光因子がPe = 0.43と無視できない値を持つ ため、電子散乱は完全には抑制されておらず、電子散乱と 核共鳴散乱線の量子干渉(ファノ効果)による非対称且つ ブロードな線形とベースラインの傾きが生じている。この 点を考慮して、666反射のスペクトルをファノ関数で解析 すると、Bサイトのみの発光スペクトル(図3のB(n)成分) と若干のAサイトとBサイトの吸収(図3のA(e)、B(e)成 分)の重ね合わせとして説明できた。一方、図3(下)には、 10100反射のメスバウアー回折スペクトルを示す。1010 0反射の電子散乱の偏光因子は、Pe~0となるため、電子 散乱が完全に抑制される。このため、構造因子から予想さ れるように、Aサイトのみの発光スペクトルが明瞭に観測 されている。この時、10 10 0反射のスペクトルは、回折 への寄与が核共鳴散乱だけなので、ファノ効果は殆ど観測

一方、上で紹介したブラッグ角が45°近辺の反射面を持 つ試料を測定する方法では、対象物質が大きく制限される。 この問題を解決するため、2016年度の開発では、試料と 検出器の間に偏光アナライザーを配置して、回折線からπ 偏光の電子散乱だけを除去する方法(偏光アナライザー法) や電子散乱に対しては禁制反射で、核共鳴散乱に対しては 許容反射になる反射(純核ブラッグ反射法)を有する試料 の結晶サイト選択的メスバウアースペクトルを観測する手 法も実験的に検証されており、汎用性のある測定と超微細 構造パラメーターを精密に決定可能な計測シーケンスを確 立できた^[5,6]。今後、これら手法を用いた多くの機能性複 サイトFe化合物の磁性・電子状態の応用研究が展開され るであろう。また、回折法を全反射メスバウアー分光法^[7] と組み合わせれば、マルチフェロイクスやスピントロニク スといった鉄系機能性薄膜材料の局所磁性探査技術の高度 化にも繋がることが期待される。

(三井 隆也)

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、高輝度・高エネルギー特性 を有するSPring-8アンジュレータ光を用いたXAFS測定 を行っている。喫緊の課題である福島環境回復を目指し たCs減容化研究及びCs吸脱着機構解明研究を始め、使 用済み核燃料廃棄物に係るガラス固化処分技術の高度化、 核燃料廃棄物分離・回収に関連した抽出分離剤の開発と 挙動解析、難分離性セレン化合物の分離に向けたスペシ エーション、セシウム含有鉱物及び土壌の低温昇華処理 技術の開発、さらに燃料デブリ対策や廃炉研究を見据え た原子力関連研究を推進している。一方、2016年4月よ り JAEA-QST 分離移管に伴い、アンジュレータ放射光高 輝度XAFS測定システムをBL22XUへ移設する計画を進 めている。これまでBL11XUで整備したXAFS測定シス テムに加え、極微量のRI・アクチノイド試料測定へ向け た高感度測定システムの構築を含めた技術開発研究も実 施している。

3-1 有機配位子によるアクチノイド・ランタノイド認識 機構の解明

アクチノイドやランタノイドを効率的に分離するための 分離法の開発は、使用済み核燃料の処理・処分方法の確立 やレアメタルのリサイクル技術等に深く関連しており、非 常に重要なテーマである。我々の研究グループでは、その 化学的性質の類似性から、相互分離が困難である3価アク チノイドや3価ランタノイドについて、その僅かなイオン サイズ差を認識して特定元素と選択的に錯形成する配位

子PTA (1,10-phenanthroline-2-carboxamide)の開発に 成功している。本研究では、その錯形成の元素選択性制御 のための新規化合物の設計・開発手法の確立を目的に、放 射光XAFS等を用いて構造解析によるイオン認識メカニズ ムの検討を行い、PTAがそのフェナントロリン部位の僅か な伸縮機構によってイオンサイズを認識していることなど を明らかにしてきた。この伸縮機構の制御を目的に、官能 基の電子吸引・供与性の大小に着目して化学修飾を行い、 PTAのフェナントロリン部位の2つの窒素原子間の距離を 変化させた誘導体を新規に合成した。今年度は、溶液中で のPTA錯体構造について放射光XAFSにより明らかにし、 単結晶X線構造解析の結果と併せて議論することでそのイ オン認識機構について検討した。その結果、新たに合成し た誘導体も同様の伸縮機構によりイオンサイズを認識する ものの、フェナントロリン部位の電子密度を最適化するこ とによって、2つの窒素原子間の距離がより大きいイオン との錯形成にする構造へ変化していることが分かった。本 結果より、フェナントロリン部位の2つの窒素原子間の距 離を制御することで特定のランタノイドへの選択性を持つ 化合物が設計可能であることが示唆された。今後、特定元 素に選択性を有する化合物が設計可能になると期待される。

3-2 鉄リン酸塩ガラス中のセリウム元素の化学状態解析

放射性廃液や固体廃棄物のガラス固化技術において、 従来のホウケイ酸ガラスの代替として、鉄リン酸塩ガラ スが有望視されている。鉄リン酸塩ガラスを廃棄物処分 処理のベースガラスとして使用する研究開発は、米国な どで進められているが、廃棄物成分がガラス中において どのような状態で存在するかは、十分な情報が集まって いるとは言い難い。そこで我々は、ホウケイ酸ガラス系 における廃棄物成分の化学状態のデータをもとに、鉄リン 酸塩ガラスにおける化学状態を調べた。この研究は、放 射性廃棄物の種類によって、最適なガラス固化処理を選 択可能性に貢献できる。

Fe₂O₃濃度の異なる鉄リン酸塩ガラスに、模擬廃液 含有量を変えた試料を作成し、Quick XAFSで化学状態 の変化を調べた。その結果、図4に示す通り、ベースガ ラスにFe₂O₃が少なく模擬廃液成分の含有量が少ない 30FeP-10W および 30FeP-20W ではCe-O 間距離は約 2.40 Åであるが、ベースガラスにFe₂O₃が多くなり模擬 廃液成分も多くなると、Ce-O 間距離が伸びると同時に、 配位数も約6から8へと増加した。特に35FeP-30Wおよび 40FeP-30Wでは、その第1ピークが大きく成長した。こ れらの結果は、ガラス中にセリウムが溶け込んだ状態から、 結晶性リン酸セリウムの発生に帰属された。結論として、 ベースガラス中にFe₂O₃が少ないほど、廃棄物成分とし てのセリウムをより多く包含できること、廃液成分濃度



図4 模擬廃液成分含有鉄リン酸塩ガラス試料のセリウムK吸収端EXAFSによる動径構造関数

20wt%まで十分に包含可能なことの2点が判明した。

3-3 難分離性核種セレンの分離に向けたスペシエーション

核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資 源化研究において、高レベル廃液からの電解法や溶媒抽 出法を用いた長寿命核種の分離回収技術の開発を行って いる。本研究では、長寿命核種であり難分離性のセレン 等の分離剤開発のための検討を行った。水溶液中でのセ レンの原子価や局所構造等の化学状態を明らかにするこ とを目的に放射光XAFS実験を行った。その結果、4価 のSe化合物を水に溶解させると4価のSeO₃²⁻として安定 に存在するが、6価のSe化合物を水に溶解させた場合に は速やかに還元され、4価と6価の中間状態または混合状 態となることが分かった。また、0価の単体Seは硝酸に 溶解させると速やかに酸化され、4価のSeO₃²⁻となった。 以上の結果より、Se化合物の水溶液中におけるもっとも 安定な化学種は4価のSeO₃²⁻であるが、一定の条件下に おいてはそれより高い原子価をとる場合があることが分 かった。

3-4 高エネルギー XAFS を利用したセシウム含有粘土鉱 物の低温昇華処理のその場観察

福島の汚染土壌減容化には土壌中の粘土鉱物に固定された放射性Csの除去が必要不可欠である。これに対して、 アルカリ塩を添加して加熱処理を行う手法が提案されてお り高いCs除去率により注目を集めているが、加熱処理中 のCs脱離過程の詳細は不明である。そこで我々はCs収着 能力が高い風化黒雲母(WB)から混合塩(NaCl-CaCl₂)を用 いてCsを除去する際の脱離機構についてその場観察を行 い、加熱中のCs局所構造変化を調べた。



図5 EXAFS 関数で得られた実空間の動径構造関数 (混合塩添加 有の室温、500°C、600°C、冷却後)

非放射性CsをWBに飽和収着し、モル比1:1の NaCl-CaCl₂混合塩を重量比1:1でWB粉末に添加し た。この試料に対して200-700℃の温度範囲で100℃ご とEXAFS測定を行い、混合塩の有無によるスペクトルの 違いを比較検討した。また加熱処理後に混合塩を除去し た試料に対して通常のXAFS測定と蛍光X線分析(XRF)を 行いCs除去率の温度依存性を調べた。その結果、混合塩 無添加の場合、200-700℃の加熱においてCsはほぼ同じ 局所構造を示し、Csは熱処理に関わらずWB中に保持さ れている事が分かった。一方混合塩を添加した場合、加 熱するにつれて構造が徐々に変化し、加熱後室温に戻し た時は完全に異なる構造を観測した(図5)。XRFによる Cs除去率測定とEXAFS解析の結果から、混合塩を添加し て700℃加熱するとほぼ全てのCsはCs-Clに近い結合距離 を示し、700℃から室温に戻した際にほぼ全てのCsがWB から除去されたことが分かった。一方、400-500℃加熱で は、Csはシリカの四面体構造に囲まれCs-O結合を保持し ていたにもかかわらず、室温への冷却過程において約5割 のCsが除去されたことがわかった。以上から我々は低温 領域(400-500℃)と高温領域(600-700℃)において異 なる2タイプのCs脱離過程が存在すると結論した。

> (塩飽 秀啓、岡本 芳浩、小林 徹、 鈴木 伸一、土井 玲祐、本田 充紀)

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、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)による研究を行っている。また、同じ非弾 性散乱分光器を用いてX線発光分光や高エネルギー分解 能蛍光検出法による高分解能X線吸収分光の測定も行う ことが可能である。測定対象は、強相関遷移金属酸化物 や燃料電池など遷移金属を含んだ実用材料である。前者 の測定では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、後者では硬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。

RIXSの研究、特に強相関電子系を対象とする場合には、 エネルギー分解能を向上させることが重要な技術開発要 素である。特に、高品質な分光アナライザーを利用する ことは、そのための鍵となる部分の一つである。分光ア ナライザーは、結晶のブラッグ反射の角度分散を利用し たものであり、散乱X線のエネルギーを分解することに 加えて、結晶を湾曲させることである程度の立体角内の X線を検出器位置に集光させる。高いエネルギー分解能 を得るためには、結晶性の良い大型単結晶が得られるSi またはGeの反射面から背面反射に近いものを選ぶことに なり、現実には、吸収端ごとにアナライザーが必要となる。

2016年度は、イリジウムL₃吸収端用のSi(844)反射 を利用したアナライザーのエッチング処理を行ったもの に更新した。エネルギー分解能を評価するためにカプト ンの弾性散乱を測定した結果を図6(a)に示す。以前の アナライザー(図中⊖)では負のエネルギー側に大きく 裾を引いており、結晶中に歪みが残っていると考えらえ る。それに対し、新しいアナライザー(図中●)では裾 がなくなっており、弾性散乱の幅も狭くなっている。半 値全幅から見積もった測定系全体でのエネルギー分解能 は48.7 meVであった。



 図6 アナライザーの評価するために行なったカプトンの弾性 散乱のスキャン

 (a) Ir L₃吸収端用Si(844)、(b) Ta L₃吸収端用Ge(840)。
 ●が実験結果であり、フィッティング(実線)で見積もった半値全幅の48.7 meV、85.2 meVがそれぞれエネルギー分解能に対応する。(a)では以前に使っていたアナライザーの測定結果を ○ で示して比較している。



図7 Ta₂NiSe₅のTa L₃吸収端RIXSスペクトル。

イリジウム用Si(844)に加え、タンタルのL₃吸収端 用にGe(840)反射を利用したアナライザーを新規導入 した。図6(b)にカプトンの弾性散乱の測定結果を示す。 Ge(840)反射はSi(844)反射に比べて背面反射から離れ ているため分解能は低下するが、それでも85.2 meV まで到達することができた。このアナライザーを利用 した測定の一例として、層状タンタルカルコゲナイド Ta₂NiSe₅のRIXSスペクトルを図7に示す。

5d 遷移金属化合物では、価電子帯にある5d電子に働 く強いスピン軌道相互作用や周りにある陰イオンとの強 い電子軌道混成などに由来して新奇な物性が発現し興味 が持たれている。

L吸収端は5d軌道に電気双極子遷移が可能であり、そのRIXSは電子状態を調べる上で有効な実験手法となり 得る。今後は、これらのアナライザーを利用して5d遷 移金属化合物の物性の解明を目指した研究を進めていく 予定である。

(石井 賢司)



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^[8,9]。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。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おこなわれている。 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可能で、放射光実 験に備えた試料作製の予備実験に用いられている。2016 年度は、前半と後半にそれぞれ窒化物半導体、ヒ化物半 導体に関する実験が進められた。

窒化物半導体については、GaNに加え、AINやInN の成長について研究をおこなった^[10]。図8に示した のは、X線逆格子マップのK=0におけるHL断面であ る。回折指数は、(a)、(b)でそれぞれ6H-SiC(0001)基板、 2H-GaN(0001)基板に対応している。6H-SiC(0001)上の AINの成長については、その場放射光X線回折測定によ り、界面に転位が発生する臨界膜厚が5 nm程度と見積 もられた。この値は、半導体へテロエピタキシャル膜の



図8 6H-SiC(0001) 基板上の AIN 膜成長 (a) と、GaN/ α -Al₂O₃ テンプレート基板上の InN 膜成長 (b) におけるその場放射光 X 線回折 の測定結果。

臨界膜厚の理論的見積もりによく用いられる Matthews & Blakeslee のモデルに比べると、やや小さい。このこ とは、その場放射光X線回折は、窒化物膜のひずみを非 常に高い感度で検出できる手法であることを示している。 一方、図8(b)に示したGaN/α-Al₂O₃テンプレート基板 上のInN膜の成長においては、0.3 nmの膜厚からInN由 来の回折ピークをとらえることができ、このときすでに 面内方向・表面垂直方向ともに、InN固有の格子定数を 示していた。すなわち、InNはほぼ完全に緩和していた。 このような挙動は6H-SiC(0001)上のGaN、AlN膜とは 対照的であり、InNとGaNの大きな格子不整合による結 果であると考えられる。

ヒ化物半導体については、異種基板上の成長の研究が 進められた。シリコン基板上のIII-V族半導体の成長は、 光電子デバイスや安価で高効率な太陽電池などの開発の 観点から、長年にわたる重要な課題となっている。平坦な 界面を得ることが困難なSi(001)基板上に代わり、Si(111) 基板上の成長が試みられているが、このときは回転双晶 の発生が問題となる。GaAs/Si(111)成長のその場放射光 X線回折による測定から、V/III比を変えることによって、 成長初期の回転双晶ドメインの大きさは変化することがわ かり、Si上のGaAs 膜の高品質化に役立つ知見を得ること ができた^[11]。また、スピントロニクス応用に向けて、ハ ーフメタル強磁性体と半導体のヘテロエピタキシャル界 面に関心が集まっている。そのような磁性材料のひとつ であるMnSbは、In組成が50%のInGaAsとほぼ格子整 合するため、高品質なヘテロエピタキシャル膜材料の候 補として期待が持たれる。そこで、GaAs(111)もしくは In_{0.5}Ga_{0.5}As(111)上に成長させたMnSb膜の上にさらに GaAsを成長させるときに生じるひずみの様子がその場放 射光X線回折により測定された^[12]。

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供用に付されてい る。2016A・B期を通じて、窒化物光デバイスの長波長 化に向けた GaInN分子線エピタキシー成長におけるひず み緩和過程の追跡や、サファイア基板・(AlGa)₂O₃基板 の表面窒化など、のべ4課題が実施された。

(高橋 正光)

参考文献

[1] T. Mitsui, N. Hirao, Y. Ohishi, R. Masuda,
Y. Nakamura, H. Enoki, K. Sakaki, and M. Seto:
J. Synchrotron Radiat. 16, (2009) 723.

[2] T. Mitsui, S. Nakamura, N. Ikeda, K. Hujiwara,

R. Masuda, Y. Kobayashi, and M. Seto: *J. Phys. Soc Jpn.* **85**, (2016) 054705.

- [3] S. Nakamura, T. Mitsui, K. Fujiwara, N. Ikeda, Y. Kobayashi, andS. Shimomura: *Hyperfine Interactions* 237, (2016) 157.
- [4] S. Nakamura, T. Mitsui, K. Fujiwara, N. Ikeda, M. Kurokuzu, and S. Shimomura: *J. Phys. Soc. Jpn.* 86, (2017) 023706.
- [5] S. Nakamura, T. Mitsui, K. Fujiwara, N. Ikeda, M. Kurokuzu, and S. Shimomura: *J. Phys. Soc. Jpn.* 86, (2017) 084701.
- [6] 中村真一,三井隆也:固体物理52, (2017) 551.
- [7] T. Mitsui, R. Masuda, M. Seto, E. Suharyadi, and K. Mibu: J. Synchrotron Radiat. 19, (2012)198.
- [8] M. Takahasi, Y. Yoneda, H. Inoue, N. Yamamoto and J. Mizuki: Jpn. J. Appl. Phys. 41, 6247 (2002).
- [9] M. Takahasi: J. Phys. Soc. Jpn. 82, 021011 (2013).
- [10] T. Sasaki, F. Ishikawa, T. Yamaguchi and M. Takahasi: Jpn. J. Appl. Phys. 55, 05FB05 (2016).
- [11] H. Suzuki, Y. Nakata, M. Takahasi, K. Ikeda,
 Y. Ohshita, O. Morohara, H. Geka, and Y.
 Moriyasu: *AIP Advances* 6, 035303 (2016).
- P. J. Mousley, C. W. Burrows, M. J. Ashwin,
 M. Takahasi, T. Sasaki and G. R. Bell: *Phys. Status Solidi B* 254, 1600503 (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

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、鈴木 伸一 土肥 玲祐、本田 充紀

放射光分析技術開発グループ

岡本 芳浩