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γ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 57 Fe放射光メスパウアー線源の開発に成功しており、実用的なメスパ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、高輝度放射光メスパウアー γ 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 (Fe_3O_4) 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(Fe_3O_4)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(Ba)は Fe^{3+} が、B サイト(Ba)は同数の Fe^{2+} と Fe^{3+} が占有しており、室温のB サイトBa で示す。サイトの対称性が異なるため、結晶構造因子がBa 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(Ba)、B サイトの構造因子を表B に示す。ところで、メスバウア

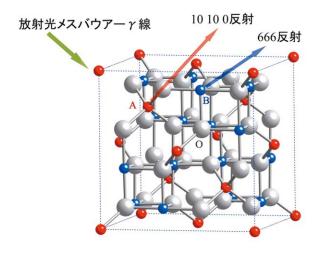


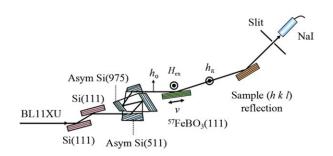
図1 Fe₃O₄の結晶構造とサイト選択的メスバウアー回折の概念 A、B、OはAサイト鉄、Bサイト鉄、酸素を表す。

表1 Fe_3O_4 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
2 2 0	8.35	$8f_{\mathrm{Fe}}$	0
2 2 2	10.24	0	$-16 if_{Fe}$
6 6 6	32.26	0	$16~if_{ m Fe}$
10 10 0	46.48	$8f_{\mathrm{Fe}}$	0

一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 (γ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 $\cos 2\theta_B$ であることから、 θ_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 ($\theta_B = 32.26^\circ$) と $10\ 10\ 0$ 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γ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 -2 θ 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 γ 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 $P_{\rm e}=0.43$ 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、 10 10 0反射のメスバウアー回折スペクトルを示す。10 10 0反射の電子散乱の偏光因子は、 P_e ~ 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

されず、一般的なローレンツ関数で良くフィットできる。 6 6 6 反射と 10 10 0 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



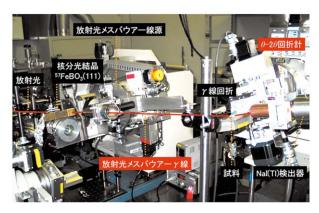


図2 メスバウアー回折装置の光学系(上)と外観写真(下) hは光の単位磁場ベクトル(添え字は偏光状態を示す)、 $H_{\rm ex}$ は外部磁場、Nal はカウンターを表す。

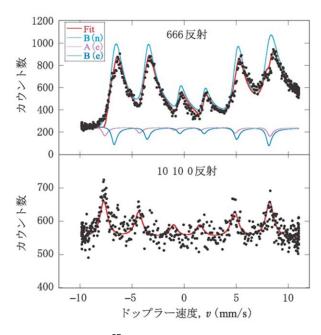


図3 45度法による 57 Fe₃O₄のサイト選択的メスバウアー回折スペクトル (上) 666 反射 (下) 10 10 0 反射。上図で、(n)、(e) はそれぞれ、核共鳴散乱、電子散乱に起因する。

選出された^[4]。

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)

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、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

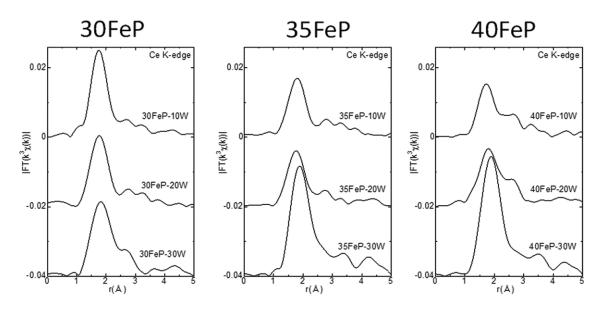


図4 模擬廃液成分含有鉄リン酸塩ガラス試料のセリウムK吸収端 EXAFS による動径構造関数

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SeO $_3$ ²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 SeO_3 2 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。

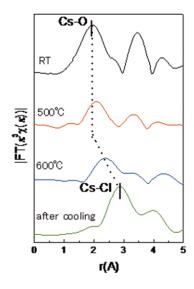


図5 EXAFS関数で得られた実空間の動径構造関数 (混合塩添加 有の室温、500°C、600°C、冷却後)

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°C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°C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°C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°C)と高温領域(600-700°C)において異なる29470Cs 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)

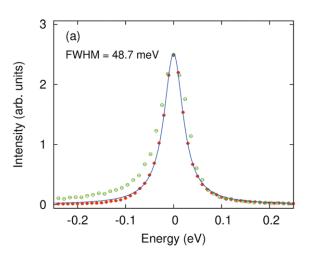
4. 共鳴非弾性 X 線散乱法による遷移金属化合物の電子 励起状態の研究

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。



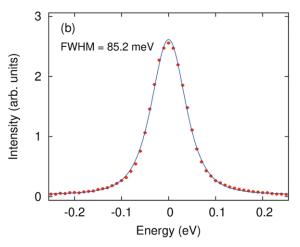


図6 アナライザーの評価するために行なったカプトンの弾性 散乱のスキャン

(a) Ir L_3 吸収端用 Si(844)、(b) Ta L_3 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 Θ で示して比較している。

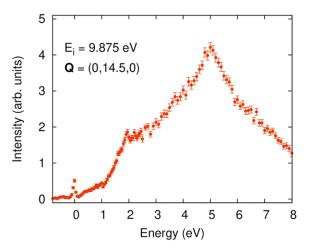


図7 Ta₂NiSe₅のTa L₃吸収端RIXSスペクトル。

イリジウム用 Si(844) に加え、タンタルの L_3 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 Ta_2NiSe_5 Or 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)

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^[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5nm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

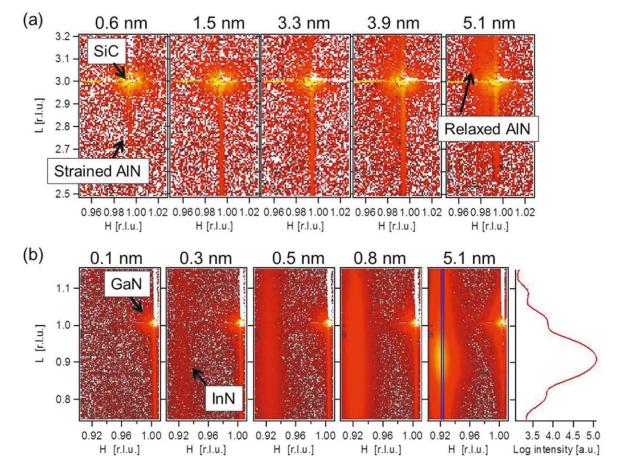


図8 6H-SiC(0001)基板上のAIN膜成長(a) と、 GaN/α -Al $_2O_3$ テンプレート基板上のInN膜成長(b) におけるその場放射光 X 線回折の測定結果。

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 - Al_2O_3 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 Gan G

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。 $2016A \cdot B$ 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・ $(AlGa)_2O_3$ 基板の表面窒化など、のベ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, and S. 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).
- [12] 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