偏極中性子反射率と軟 X 線深さ分解 X 線磁気円二色性による強磁性／反強磁性界面におけるねじれた磁化の観察

雨宮 健太¹, 鈴木 真粧子^{1,2}

(高エネルギー加速器研究機構¹, 群馬大学²)

Observation of Twisted Magnetization at Ferromagnet/Antiferromagnet Interface by Means of Polarized Neutron Reflectivity and Soft X-ray Depth-resolved X-ray Magnetic Circular Dichroism

Kenta Amemiya¹ and Masako Suzuki-Sakamaki^{1,2}

High Energy Accelerator Research Organization¹ and Gunma University²

ABSTRACT

A twisted magnetic structure in a Ni film attached to an antiferromagnetic FeMn layer is suggested by a complimentary use of the polarized neutron reflectivity (PNR) and the depth-resolved X-ray magnetic circular dichroism (XMCD) techniques. The depth-resolved XMCD shows that the perpendicular magnetization component in the Ni film decreases around the interface to FeMn, while the PNR data indicates that an in-plane magnetization component is induced in Ni around the interface to FeMn by weak in-plane magnetic fields. These results are reasonably interpreted by assuming that the magnetic moment in the Ni layer is twisted from the perpendicular to the in-plane directions towards the interface to FeMn.

Keywords: *Depth-resolved X-ray magnetic circular dichroism, Polarized neutron reflectivity, Ferromagnetic-antiferromagnetic interaction, Magnetic anisotropy*

1. はじめに

磁性薄膜において、深さ方向の磁化の分布をサノメーターもしくはそれ以下のスケールで観察することは、非常に重要かつ困難である。例えば本稿で取り上げる強磁性体と反強磁性体の界面においては、磁気モーメントの揃った強磁性体と、原子単位で磁気モーメントが逆を向いている反強磁性体がいきなり接するため、界面における強い磁氣的相互作用によって、磁気状態が原子層レベルの空間スケールで深さ方向に変化していくことが予想される。このような界面における磁化を、深さ方向に分解して観察できる手法として、偏極中性子反射率 (Polarized neutron reflectivity; PNR) が知られている。これはスピン偏極した中性子を試料表面に斜入射で照射し、その反射率を波数 q の関数として測定するものである。一方、著者らは十数年前から、円偏光 X 線の吸収スペクトルから元素ごとの磁気モーメントの情報が得られる X 線磁気円二色性 (X-ray magnetic circular dichroism; XMCD) において、X 線吸収に伴って放出される電子を角度分解して検出することで深さ方向の情報を得る、深さ分解 XMCD を開発してきた[1, 2]。

本稿では、膜厚の増加とともに特異な磁気異方性変化を示すことが知られている Ni 薄膜と、典型的な反強磁性金属である FeMn 合金の薄膜との界

面における磁化の深さ方向の分布を、偏極中性子反射率と軟 X 線深さ分解 XMCD を相補的に用いて観察した研究を紹介する[3, 4]。

2. FeMn/Ni/Cu(001)の磁気異方性

Cu(001)単結晶表面に成長させた Ni 薄膜は、膜厚が薄い時には面内方向に磁化容易軸を持つが、7-11 ML (monolayer; 原子層) 程度で面直磁化へと転移し、さらに 30-50 ML 程度で再び面内磁化を示すことが知られている[5, 6]。この Ni 薄膜に、反強磁性体である FeMn を接合させると、Ni の磁気異方性にどのような変化が起こるだろうか。なお、FeMn は fcc 型の不規則合金で、Ni/Cu(001)の上では(001)面がそのまま成長する[7]。また、FeMn の磁気構造はいささか複雑で、それぞれのサイトのスピンは斜め方向を向いているが、(001)面で見ると、原子層内の磁気モーメントのベクトル和が層ごとに $\pm z$ 方向で交互に入れ替わる、一種の層状反強磁だと言われている[7, 8]。

Fig. 1 に、Cu(001)単結晶表面に、場所によって厚さの異なる (wedge 状の) Ni 薄膜を成長させ、その上に均一な厚さの FeMn を順次成長させて、残留磁化状態において室温で測定した Ni L 吸収端 XMCD の強度変化を示す[3]。X 線ビームを当てる位置を変えることで、Ni の膜厚依存性を測定

している。XMCD 強度は磁化をビームの進行方向に射影した成分を反映するが、このデータは直入射条件で測定したものであるため、磁化の面直成分を観察していることになる。まず FeMn が無い状態では、過去の報告と同様に Ni の膜厚 9 ML 程度を境に面直磁化が現れる。これに FeMn を成長させると、FeMn 膜厚 10 ML において、面直磁化が現れる Ni 膜厚（転移膜厚）が 6 ML 程度へと大幅にシフトする。すなわち、膜全体として垂直磁化を示す傾向が強くなる。ところが、さらに FeMn を 15-25 ML へと成長させると、今度は逆に面内磁化を示す領域が広がっていく。

これらの磁気異方性変化のうち、FeMn 膜厚が 10 ML 程度までの薄い領域で起こる面直磁気異方性の増強は、Ni 表面の状態変化によるものと推測される。というのは、Ni 薄膜が直接真空と接している場合には、表面 Ni 層は面内磁化を強く好むため、そこに Cu を成長させたり分子を吸着させたりすることで、面直磁気異方性が増強されることが知られているからである[5, 6]。一方、FeMn 膜厚を 10 ML から 25 ML へと増加させることによって起こる面内磁気異方性の増強は、FeMn の膜厚の増加に伴って Néel 温度が上昇し[8]、FeMn が室温で反強磁性を示すようになることに伴う変化であると考えられる。なお、ここで観察された FeMn 膜厚の増加に伴う面内磁気異方性の増強は、過去の報告と一致している[7]。本研究では、このような磁気異方性変化の起源を探るために、FeMn と Ni の界面における磁化の深さ方向分布の観察を行った。

Fig. 1. Ni thickness dependence of normal-incidence Ni L-edge XMCD intensity at remanent state for different FeMn thicknesses.

3. 軟 X 線深さ分解 XMCD による観察

Fig. 2(a)に深さ分解 XMCD の測定原理を模式的に示す。軟 X 線領域の XMCD 測定においては、透過 X 線強度の測定が極めて困難なため、電子収量法と呼ばれる手法が用いられることが多い。これは、X 線の吸収によって生じる内殻空孔が緩和する際に放出される Auger 電子（およびそれに伴って発生する 2 次電子）を検出し、その数が吸収強度に比例することを利用するものである。この時、試料内部における X 線吸収に伴って放出された電子は、表面に到達するまでに減衰するため（典型的な減衰長は数 nm）、電子収量法によって測定したデータは、表面付近で起こった X 線吸収の情

報を多く含むことになる。さらに、表面すれすれ方向に放出される電子は、表面垂直に放出される電子に比べて、より長い距離を通らないと表面に到達できないために、より浅いところの情報の占める割合が大きくなる。したがって、Fig. 2(a)に示すように、位置分解能を有する電子検出器を用いて、様々な検出角(θ_d)で Auger 電子を検出することによって、様々な検出深度(λ_e)の XMCD データを一度に得ることができる。本研究では、Fig. 2(b)に示す、位置分解検出器と薄膜の蒸着源を備えた超高真空チェンバーを、Photon Factory (PF)の軟 X 線アンジュレータビームライン (BL-16A) に接続し、薄膜の作製と深さ分解 XMCD の測定を、真空を破ることなく連続で行うことができる in-situ 実験装置を用いて実験を行った。なお、Auger 電子を角度分解して検出するという原理から明らかなように、この手法は磁場中では適用できないので、作製した薄膜を真空中に設置した電磁石によって一度磁化してから、残留磁化状態で XMCD 測定を行った。

Fig. 2. (a) Schematic setup for depth-resolved XMCD technique and (b) picture of in-situ experiment chamber at PF BL-16A.

Fig. 3(a)に、膜全体として面直磁化を示す、膜厚 16 ML の Ni 薄膜に対して測定した Ni L 吸収端 XMCD スペクトルの検出深度(λ_e)依存性を示す。測定は直入射で行ったので、磁化の面直成分を観察している。ここで、XMCD スペクトルは Ni の量に対して規格化されているので、Ni 一原子あたりの磁気モーメントを反映している。FeMn 膜厚 5 ML の場合には、XMCD 強度は検出深度に依存せず、Ni は深さ方向に一様に磁化されていることがわかる。ところが FeMn 膜厚が増加するにつれて、XMCD 強度が減少するとともに、表面敏感なデータほど、その減少が顕著になってくる。これは、主に FeMn との界面付近において、Ni の磁化の面直成分が減少していることを強く示唆している。Fig. 3(b)に、様々な検出深度の XMCD スペクトルそれぞれに対して、XMCD の総和則[9, 10]を適用して見積もった、有効スピン磁気モーメント(m_s^{eff})を示す。深さ分解 XMCD で得られるのは、特定の深さからのシグナルではなく、深さ z に応じた減衰因子 $\exp(-z/\lambda_e)$ のかかった、すべての深さからのシグナルの加重平均である[1, 2]。したがって、

Fig. 3(b)がそのまま磁気モーメントの深さ分布を表すわけではないが、FeMn との界面付近においてNi の磁化の面直成分が減少していることが、ほぼ直接的に示されたといっていだろう。このような変化は、FeMn がかなり厚い領域で生じているため、界面での軌道混成などによってNi の状態そのものに影響を及ぼしているというよりは、FeMn の膜厚が増加して反強磁性的な性質を示すことに伴う、強磁性／反強磁性的の磁氣的相互作用によって、Ni の磁化に変化が生じていると考えるのが妥当であろう。

Fig. 3. (a) Probing depth (λ_e) dependence of normal-incidence Ni L-edge XMCD spectrum for FeMn (x ML) / Ni (16 ML) / Cu(001) and (b) effective spin magnetic moment (m_s^{eff}) estimated from each XMCD spectrum as a function of λ_e .

次に、膜全体として面内磁化を示す、膜厚 6.5 ML の Ni 薄膜に対して同様に測定した Ni L 吸収端深さ分解 XMCD の結果を Fig.4 に示す。この場合は、磁化の面内成分を検出するために、斜入射条件で測定を行った（直入射から 60 度、試料を回転）。なお、検出深度は入射角ではなく Auger 電子の検出角で決まるため、斜入射条件でも全く同様に深さ分解 XMCD 測定を行うことができる。Ni 膜厚 6.5 ML の場合、室温では Ni の磁化があまり大きくないことと、完全に面内方向に X 線を入射しているわけではないことから、XMCD 強度そのものは若干小さいが、面直磁化の場合とは異なり、

FeMn 膜厚が 15 ML でも XMCD 強度は検出深度にほとんど依存していない。すなわち、Ni の磁化の面内成分は、FeMn との界面でも内部層と同程度に保たれていることが明らかになった。

以上のように、軟 X 線深さ分解 XMCD の結果から、FeMn が反強磁性的な性質を示すようになると、Ni の磁化が面直方向を向いているときには FeMn との界面付近で（面直方向の）磁化が減少し、面内方向を向いているときには、界面でも（面内方向の）磁化が減少しない、ということが見えてきた。これに、先に述べた FeMn による Ni の面内磁気異方性の増強を合わせて考えると、一つの仮説が浮かびあがってくる。すなわち、FeMn との界面付近で、Ni の磁化が面内方向を向きやすくなっているという描像である。もしこの仮説が正しければ、Ni が十分に厚くて、全体としては面直方向に磁化が向いている場合には、FeMn との界面付近で磁化が面内方向に傾くことにより、磁化の面直成分が減少すると説明できるし、Ni が薄くて膜全体として面内磁化を示す場合には、FeMn との界面はそのまま面内磁化を保つと理解できる。この仮説を検証するには、Ni が全体としては面直磁化を示す状態で、界面に生じると予測される面内磁化成分を観察すればよいが、一言に面内と言っても、Cu(001)表面は 4 回対称を有するため、面内での磁化方向を揃えるために、ある程度の外部磁場を印加する必要がある。ところが、上述の通り深さ分解 XMCD は、磁場中では測定できない。そこで、磁場中で深さ方向の磁化分布を知ることができる、偏極中性子反射率を利用することとした。

Fig. 4. (a) Probing depth (λ_e) dependence of grazing-incidence Ni L-edge XMCD spectrum for FeMn (15 ML) / Ni (6.5 ML) / Cu(001) and (b) effective spin magnetic moment (m_s^{eff}) estimated from each XMCD spectrum as a function of λ_e .

4. PNR による観察

前節までに紹介した実験は、すべて *in situ* 測定、すなわち試料作製から測定までを同じ真空チャンバー内で連続して行ったものである。しかしながら、PNR の測定を行う J-PARC MLF の BL17 (SHARAKU) には、そのような実験装置はないため、作製した薄膜試料に十分に厚い Cu を蒸着し、大気中に取り出しても FeMn や Ni に影響がないようにして持ち込んだ。Fig. 5 に試料をマウントしたホルダーと、それを電磁石を備えた反射率計に取り付けた際の写真を示す。Cu(001)基板は $\phi 10$ mm の円板で、その全面に Ni (11 ML), FeMn (21 ML) および Cu (74 ML) を順次成長させてある。Fig. 1 からわかるように、これらの膜厚の組み合わせは、Ni 薄膜全体としてはほぼ面直磁化を示すが、面内磁化成分もわずかに含まれているという微妙な領域であり、面内方向に磁場をかけることで容易に磁化の向きを制御できると期待される。なお、MLF BL17 では、中性子の偏極、印加磁場ともに鉛直方向を向いており、試料は縦置き配置（法線が水平方向）になっている。つまり、鉛直方向（試料表面から見ると面内方向）の磁化成分を観察することになる。したがって、ほぼ面直磁化を示す今回の試料の場合、磁場を印加しないと偏極シグナルは観測されず、鉛直方向に磁場を印加することで、少しずつシグナルが増加することが期待される。

Fig. 5. (a) Cu (74 ML) / FeMn (21 ML) / Ni (11 ML) / Cu(001) sample mounted on Al holder and (b) PNR apparatus at MLF BL17 (SHARAKU).

Fig. 6 に、1 kOe の磁場中で測定した PNR データを示す[3]。もともと面直磁化を示す試料なので、PNR シグナル（偏極による反射率の違い）はかなり小さいが、磁場によって誘起された面内磁化成分を確かに観測できている。残念ながら、得られた反射率曲線から直感的に、磁化がどこにあるのか（FeMn との界面付近なのか Ni 薄膜の内部なのか）を区別することはできないが、反射率曲線を適切なパラメータを用いて解析することで、磁化の深さ方向分布を求めることができる。ここでは、磁化は Ni のみが持つものとし（FeMn は反強磁性なので大きくは間違っていないであろう）、Ni 薄膜を FeMn との界面と残りの内部層の二つの領域に分割して、それぞれの領域の厚さと（面内方向の）磁気モーメントをパラメータとした。なお、他にも Cu 層と FeMn 層の膜厚と散乱長密度、お

よび、それぞれの界面の粗さもパラメータにしている。フィッティングによって得られた結果は、Fig. 6 に示す通り、FeMn との界面層(1 ML)の磁気モーメントが $0.32 \mu_B/\text{atom}$ 、内部層(10 ML)のそれが $0.20 \mu_B/\text{atom}$ となり、FeMn との界面において Ni の磁化の面内成分が大きいことがわかる。これは上述の仮説、すなわち FeMn との界面付近で Ni の磁化が面内方向を向きやすくなっており、Ni 全体としては面直磁化を示す場合にも、界面付近では磁化が面内方向に傾いているという描像を強くサポートするものである。なお、解析では単純化のために Ni を 2 つの領域に分割したが、実際には Ni の内部から FeMn との界面に向かって徐々に磁化が傾いていく、「ねじれた磁化」という描像がもっともらしいと思われる。

Fig. 6. PNR curves (points), R^+ and R^- , for Cu(74 ML) / FeMn (21 ML) / Ni (11 ML) / Cu(001) measured at 1 kOe magnetic field, together with simulated curves (lines).

最後に、これまでの測定から示唆された「ねじれた磁化」が、外部磁場によってどのように変化するかを調べるために、PNR の磁場依存性を測定した (Fig. 7) [4]。なお、1 kOe では $q \sim 0.1$ から $q \sim 1.5 \text{ nm}^{-1}$ の範囲で測定を行ったが、特に高い q 領域の測定は非常に時間がかかるので、磁場依存性の測定では q の範囲を限定した。また、偏極シグナルを見やすくするために、異なる偏極に対する反射率の差 (ΔR) を反射率の平均値 (R^{av}) で割った値を Fig. 7(b) に示した。

この試料は、残留磁化状態でほぼ面直磁化を示すため、外部磁場がない場合には有意な PNR シグナルは見られない。そこから磁場を大きくするにつれてシグナルも増加し、10 kOe でほぼ飽和に達する。これら一連の反射率曲線に対して、先ほどと同様に Ni を二つの領域に分割したモデルを用いてフィッティングを行って得られた、Ni の界面層と内部層の磁気モーメントを Fig. 8 に示す。FeMn との界面層の磁化 ($m_{\text{interface}}$) は、比較的小さい磁場で急激に立ち上がり、2-5 kOe 程度でほぼ飽和する。一方内部の Ni 層の磁化 (m_{inner})、磁場の増加につれてゆっくりと増加していく。ここで観察

しているのは、いずれも磁化の面内成分であることに注意しながら、Ni 薄膜内の磁気構造を推測すると、Fig. 8 に示すように、まず界面付近の磁化が面内方向に傾きはじめ、磁場の増加につれて内部の方の磁化も面内方向に傾いていくという状況が想像できる。このように、軟 X 線深さ分解 XMCD と偏極中性子反射率の相補的な利用によって、反強磁性 FeMn との界面において、Ni の磁化が面直から面内方向へとねじれていくことを示唆する結果を得ることができた。

Fig. 7. (a) PNR curves, R^+ and R^- , for Cu (74 ML) / FeMn (21 ML) / Ni (11 ML) / Cu(001) measured at different magnetic fields, H , and (b) difference, $\Delta R = R^+ - R^-$, divided by average, $R^{av} = (R^+ + R^-)/2$, of them, together with simulated curves. The data for different H are vertically shifted.

Fig. 8. In-plane component of the magnetic moment in the interface and inner region of the Ni film estimated by fitting the PNR curves as a function of applied magnetic field, H . The lines are guides to eye. The expected magnetic structure is schematically illustrated.

4. FeMn による磁気異方性変化の起源

以上の結果は、FeMn との界面において Ni の面内磁気異方性が増強されることに起因すると考えられるので、ここでは、そのような磁気異方性変化の起源について述べる。上述の通り、この変化は FeMn が十分厚くなってから起こるので、界面における軌道混成などによる Ni の電子状態の変化というよりは、FeMn の反強磁性的な磁気構造

が影響していると考えるのが自然であろう。実際、FeMn による Ni の面内磁気異方性の増強は、過去にも報告されており、その起源は以下のように説明されている[7]。上述の通り、FeMn は(001)面内の磁気モーメントのベクトル和が、上向きと下向きで層ごとに交互に入れ替わる、一種の層状反強磁性と考えられる。したがって、FeMn/Ni 界面が完全に平坦であれば、Ni と接する FeMn 層は全て同じ向きの磁化を持つが、実際の Ni 薄膜には必ず原子層ステップが存在するため、その上に FeMn を成長させると、ステップを一つ上がるごとに、Ni と接する FeMn 層の磁化が上向きと下向きの間で交互に変化することになる。このような状態で Ni が面直磁化を持つと、ある部分では界面の FeMn 層の磁化と並行だが、一つステップを上がると反平行という、非常に不自然な状態を生じてしまう。一方、Ni が面内磁化であれば、界面 FeMn 層と Ni の磁化は、ステップに関わらず常に直交することになり、少なくともフラストレーションは解消される。これが、FeMn が反強磁性的な性質を示すことによって Ni の面内磁気異方性が増強される起源と考えられている。

5. PNR と深さ分解 XMCD の相補性

最後に、この特集の主題である、プローブの相補性について述べたい。XMCD は、それ自体では深さ方向の分析はできないが、電子の出射角を分解することで原子層レベルの分解能を持つ深さ分解 XMCD を実現することができた。一方 PNR は、もともと深さ分解分析のための手法といっても過言ではなく、原理的に原子層レベルの深さ分解能を実現できる。このように、いずれの手法も深さ分解した磁気解析を目的としているが、筆者の感じる最も大きな違いは、深さ分解 XMCD の方が直感的であるという点である。もともと XMCD 自体が直感的にわかりやすい手法で、例えば Fig. 3 のようなデータを見れば、他にもない Ni が磁化を持っていることが一目瞭然である。さらに深さ分解 XMCD でも、検出深度が浅いデータの方が XMCD 強度が小さければ、表面（ここでは FeMn との界面）付近の磁化が小さいということが容易に結論できる。これに対して PNR では、Fig. 7 のようなデータを見ても、シグナルが Ni に由来するかどうかにもすぐにはわからないし、ましてや界面層が内部層よりも大きな面内磁化を持っていることは、本格的な解析をしない限りわからない（もっと慣れてくれば「神の眼」を持つこともできるのかもしれない）。ただし、深さ分解 XMCD の結果を直感的に解釈できるのは、基本的には表面に近い側だけである。例えば今回のような試料で、Cu との界面の磁化がどうなっているかを、データから直接予測するのはほとんど不可能である。いずれにせよ、「直感的」という表現は必ずしも科学的ではないが、実際に得られた結果を自信を持って世に送り出すために、極めて重要なことだと感じている。

もう少し「科学的」に、これらの手法の長所と短所を考察したい。一つ忘れてはいけないのは、PNRは面内磁化を観察する手法であり、面直磁化の解析は出来ないという点であるが、ここでは面内磁化を想定して考察を続ける。深さ分解XMCDは、表面付近において元素選択的に磁化の深さ分布を原子層レベルの分解能で観察できる。ただし、表面から遠くなるほど解析は困難になる。また、今回の試料のように表面側が別の元素からなる膜で覆われている場合にも、元素選択性のおかげで解析は可能であるが、電子は被覆層を通る間にも減衰するので、S/N比は文字通り指数関数的に悪化するし、被覆層から放出される（吸収スペクトルそのものには寄与しない）電子によってS/B比も大幅に悪化する。例えば、最表面から放出される電子の量を1とすると、深さ1 nmからの電子は、検出深度 $\lambda_e = 0.5$ nmの場合 $\exp(-1/0.5) = 0.135$ 、 $\lambda_e = 1$ nmでは $\exp(-1/1) = 0.368$ となり、この違いから表面層のシグナルを分離できるのだが、仮に2 nmの被覆層があると、もともと1であった最表面（この場合は界面）からの電子の量は、 $\lambda_e = 0.5$ 、1 nmに対してそれぞれ0.018、0.135にまで減少し、（界面から測って）深さ1 nmからの電子も同様に、0.0024、0.050まで減少する。もちろん、表面（界面）からの電子と深さ1 nmからの電子の量の比は、被覆層の有無によらず一定なので解析の原理は変わらないが、わずか2 nmの被覆層によって大幅にシグナル強度が減少することがよくわかる。ちなみに、それならば λ_e を大きくすればいいと思うかもしれないが、そうすると表面（界面）からの電子と深さ1 nmからの電子の量に差がつかず、深さ分解解析ができなくなってしまう。このように、深さ分解XMCDは表面付近でこそ威力を発揮する手法である。一方でPNRでは、この程度の被覆層によってシグナル強度が減少するようなことはない。また、表面側の界面と基板側の界面は、どちらも反射率曲線に寄与するので、いずれの界面も解析できる。つまりPNRは、「埋もれた界面」の解析において、特に威力を発揮することになる。

もう一つの大きな違いは、外場の影響である。電子を角度分解する深さ分解XMCDは、磁場や電場のような外場中で測定することはできない。一方で中性子はそういった外場の影響を受けないため、PNRは磁場中でも電場中でも全く問題なく測定できる。これが今回、PNRとの相補的な実験を行った最大の理由である。ただ、筆者らも深さ分解XMCDの最大の弱点をいつまでも放置するつもりはなく、最近、電子のかわりに蛍光X線を検出することで、外場中の深さ分解XMCD測定を実現した[11, 12]。さらに、被覆層によるS/B比の悪化を防ぐために、蛍光X線を分光する、蛍光選別深さ分解XMCDの開発も行っている[13]。とは言え、「埋もれた界面」の分析におけるPNRの優位性はゆるぎないと思われるので、今後もそれぞれの手法を磨き合い、相補利用による界面研究を続けていきたいと考えている。

謝辞

PNRの測定および解析においては、武田全康氏（JAEA）と水沢まり氏（CROSS）に多大なご協力をいただいた。この場を借りて心から感謝の意を表したい。深さ分解XMCDおよび偏極中性子反射率の測定はそれぞれ、PF Program Advisory Committee (No. 2010S2-001) および MLF Program Advisory Committee (No. 2012B140) による課題採択のもとで行った。また、本研究は文部科学省の量子ビーム基盤技術開発プログラム（2008-2012年）の支援を受けて行った。

参考文献

- [1] K. Amemiya *et al.*, Appl. Phys. Lett. **84**, 936 (2004).
- [2] K. Amemiya, Phys. Chem. Chem. Phys. **14**, 10477 (2012).
- [3] K. Amemiya *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 054404 (2014).
- [4] K. Amemiya *et al.*, JPS Conf. Proc. **8**, 034004 (2015).
- [5] W. L. O'Brien *et al.*, Phys. Rev. B **54**, 9297 (1996).
- [6] R. Vollmer, *et al.*, Phys. Rev. B **60**, 6277 (1999).
- [7] J. Wu *et al.*, Phys. Rev. B **79**, 212411 (2009).
- [8] D. Schmitz *et al.*, Phys. Rev. B **81**, 224422 (2010).
- [9] B. T. Thole *et al.*, Phys. Rev. Lett. **68**, 1943 (1992).
- [10] P. Carra *et al.*, Phys. Rev. Lett. **70**, 694 (1993).
- [11] M. Sakamaki and K. Amemiya, Rev. Sci. Instrum. **88**, 083901 (2017).
- [12] M. Sakamaki and K. Amemiya, Phys. Chem. Chem. Phys. **20**, 20004 (2018).
- [13] M. S.-. Sakamaki and K. Amemiya, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 120398 (2018).