

スピン偏極 LEEM

Spin-Polarized Low Energy Electron Microscopy

越川 孝範^a, 鈴木 雅彦^a, 安江 常夫^a, E. Bauer^b, 中西 彊^{c*}, 金 秀光^d, 竹田 美和^e
Takanori Koshikawa, Masahiko Suzuki, Tsuneo Yasue, Ernst Bauer, Tsutomu Nakanishi, Xiunuang Jin and Yoshikazu Takeda

^a大阪電気通信大学エレクトロニクス基礎研究所

^bDept. of Physics and Astronomy, Arizona State Univ.

^c名古屋大学理学研究科

^d名古屋大学工学研究科

^e科学技術交流財団シンクロトロン光センター

要旨 低エネルギー電子顕微鏡 (LEEM)・光電子顕微鏡 (PEEM) は表面の現象を実時間かつ多機能で観察する表面電子顕微鏡として注目を集めている。ここでは LEEM にスピン偏極電子ビームを照射することによる、磁区観察の機能向上のための開発ならびに得られた結果について最近の状況を報告する。スピン偏極電子ビームを用いた磁区コントラストは弱いため実時間観察を実現しようとすると、電子銃の高輝度化、高スピン偏極化、電子源 (フォトカソード) の長寿命化を実現しなければならない。そのため、励起用レーザー光の背面入射による高輝度化とそれに伴う歪み超格子フォトカソードの開発および偏極度の向上、極高真空 (XHV) の実現と電子光学系の新しいデザインによる長寿命化を達成した。また、開発したスピン偏極 LEEM (SPLEEM) を用いてスピントロニクス薄膜材料として期待される $[\text{CoNi}]_y$ 多層膜の詳細な観察を行った。これらの一連の成果につき報告する。

キーワード：スピン偏極低エネルギー電子顕微鏡，動的観察，スピントロニクス，磁区観察，歪み超格子

1. はじめに

低エネルギー電子顕微鏡 (LEEM) ならびに光電子顕微鏡 (PEEM) は従来から広く使用されてきた透過型電子顕微鏡 (TEM) や走査型電子顕微鏡 (SEM) とは異なる機能を持つために表面に関する基礎的な研究分野は勿論、電子源のテスターならびに半導体テスターとしても実用化されようとしている^{1~5}。日本でも開発が行われてきたが^{6,7}、低エネルギー電子顕微鏡 (LEEM) が実用的な形で世に現れたのは 1985 年の Telieps と Bauer の長年にわたる開発の結果である^{8,9}。そのために比較的新しい表面電子顕微鏡だと思われるが、LEEM/PEEM の原型ともいふべき Emission microscope (EM) または Cathode lens microscope と呼ばれた電子顕微鏡の開発が 1930 年代の初期から行われてきており非常に長い開発の歴史を持っている¹⁰。しかし、低エネルギーの電子を信号源にするために表面の汚染に敏感であり、表面現象を観察しようとする超高真空が必要になる。しかし多くの電子光学系を組み込んだ電子顕微鏡を超高真空にするということは簡単ではなかった。24 年間の開発期間を経たのちに完成した Bauer グループの LEEM 開発の成功を待つ必要があっ

た^{8,9}。光電子顕微鏡 (PEEM) は入射ビームとして電子ではなく紫外光やレーザー光あるいは X 線 (放射光) を用いる。PEEM の機能だけを持った顕微鏡も開発されているが、LEEM と PEEM の機能が一体になった顕微鏡も多く普及している。それ以外にも原子、イオン、He 等の準安定原子 (ごく表面の情報を得ることが可能) 等を入射ビームにすることも可能である。このように入射ビームに多様性があるために多機能性があり、個々の実験室ではもちろん放射光施設で放射光を光源とする新しい顕微鏡としても多く使用されている^{1~3}。将来は自由電子レーザーを光源として利用することも当然検討されている。

一方、メモリデバイス材料の詳細な磁性特性を明らかにすることは高速 MRAM 開発にとって大変重要である^{11,12}。実用化されている「電流磁場方式」は大容量化には不利とされており、それに代わる「スピントランスファートルク (STT) 方式」や「電場印加方式」等の提案がなされてきた^{13~19}。このような新しいデバイスに有用な材料を開発する場合、必要となるのはナノオーダーの磁区特性の詳細を知ることである。種々の観察手段が開発されてきた。代表的なものを上げると、光学的手法 (カー効果顕微鏡)、スピン走査電子顕微鏡 (スピン SEM)、透過電子顕微鏡 (TEM, ローレンツ法, ホログラフィ法)、磁気力顕微鏡 (MFM)、スピン偏極 STM (走査トンネル顕微鏡)、X 線磁気円二色性光電子顕

* 〒630-8530 寝屋川市初町 18-8
E-mail: kosikawa@isc.osakac.ac.jp
2013 年 2 月 1 日受付

微鏡 (XMCDPEEM) と X 線磁気線二色性光電子顕微鏡 (XMLDPEEM) (レーザを使用した PEEM もある), スピン偏極低エネルギー電子顕微鏡 (SPLEEM) 等がある. それぞれ長所ならびに短所がある. カー効果顕微鏡は手軽に使用できるという長所があるが, 光学手法であるので空間分解能が高くない. TEM の分解能は高いが薄膜を使うのでバルクの性質を知るときには問題が生じる. スピン SEM は実用的な材料に有効であるが測定に時間がかかる. MFM は比較的高い空間分解能を有しているが, 早い現象を見る場合には不利である. スピン偏極 STM は原子分解能を持っており分解能としては最も高い. ただ, 自由に探針のスピン方向を制御できない欠点がある. XMCDPEEM と XMLDPEEM は有効な観察手段であるが分解能が多少劣る (100 nm オーダ) ことと放射光という大型施設を使用するという不便さがある. 最近ではレーザの偏光と PEEM を組み合わせた観察も行われている. 放射光施設に行かなくてもいいために, 今後の発展が期待されている. SPLEEM は 10 nm オーダの空間分解能 (取差補正をすると 2-3 nm) を有しているが一画面得るのに従来は 5-30 秒オーダ必要であった. 本解説では投影型の表面顕微鏡である低エネルギー電子顕微鏡 (LEEM)¹⁻⁴⁾ がもつ長所である実時間観察の可能性を磁区観察にも適用したいと考えて開発を行ってきたので, その開発の内容と得られた結果の一部を報告する. 具体的には輝度が高く, 偏極度が高いかつカソードの寿命が長い電子銃の開発が必要である. さらに開発した顕微鏡を用いてスピントロニクスにとって重要である磁性薄膜材料の磁区特性の実時間観察も行ったのでそれらの結果の一部も紹介する²⁷⁻²⁸⁾.

2. SPLEEM を用いた磁区観察

スピン偏極電子を用いて磁区を観察する原理を述べる. 図 1 はスピン偏極した電子 (スピンの方向はカソード面に垂直) がカソードから出射して, 試料に照射する様子を示している¹⁾. カソードとして従来は通常 GaAs を使用してきた. このカソードの円偏光したレーザ光を入射させてスピン偏極した電子ビームを取り出す. その後, 電場と磁場を重畳したスピンマニピュレータにより試料面と垂直方向にスピン方向を変えることができる. またコイルで構成されたスピンローテータで面内方向にスピン方向を変えることができる. このようにして真空中において三次元の自由な方向に電子線のスピンの方向を操作することができる. 測定手法により, 自由にスピンまたは磁区方向を変えるのが難しい場合があるが, SPLEEM は方向に関して定量的な測定ができる可能性を有していることを意味している. 入射電子ビームのスピン偏極を P , 試料の磁化を M とすると, P と M を用いて以下のよう交換相互作用による項を表すことができる.

$$V_{\text{ex}} \sim P \cdot M \quad (1)$$

LEEM の強度 I は

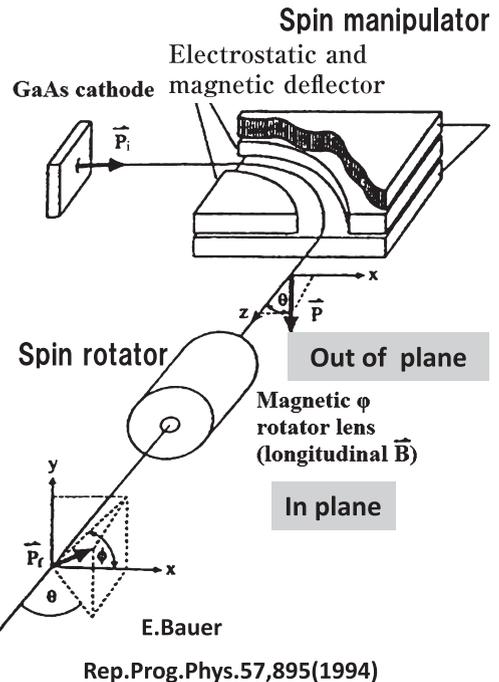


図 1 スピン偏極電子ビームを用いた磁性材料の磁区観察の原理¹⁾. スピンマニピュレータで試料表面に対して垂直方向に, スピンローテータで面内方向に入射電子ビームのスビンの方向を変えることができる.

$$I = I_0 + I_{\text{ex}} \quad (2)$$

となる.

I_{ex} は V_{ex} に比例した入射スピン偏極電子と試料の磁化の方向に由来する強度である. I_0 は通常の LEEM 像の強度であり, I_{ex} が磁化に依存する強度に対応する. この強度をそのまま像にすると I_0 が大変大きいために I_{ex} を観察するのは難しい. レーザの円偏光の方向を変えることにより, 出射する電子ビームのスビンの方向が 180° 変わる. そこで二種類の強度 I^\pm を得ることが出来る.

$$I^\pm = I_0 + I_{\text{ex}}^\pm \quad (3)$$

この強度をもとにして, 磁区コントラストは

$$A_{\text{ex}} = (I_{\text{ex}}^+ - I_{\text{ex}}^-) / (I_{\text{ex}}^+ + I_{\text{ex}}^-) \quad (4)$$

となる. つまり強い LEEM による強度 I_0 が消え, 磁化によるコントラストだけが得られることになる. 試料の磁区コントラストを得る場合には 2 枚の像を取る必要があることを示している.

3. 超高輝度, 高偏極, 長寿命スピン電子銃の開発²⁰⁻²³⁾

SPLEEM 用の電子銃の開発は Bauer のグループにより行われた²⁴⁾. これを用いて種々の磁区観察が行われてきた. 数年前にこれをもとにしてスピン偏極電子銃が市販された. ここでは著者らも手に入れたこの市販のスピン偏極電子銃との比較を中心にして述べることにする. 市販の SPLEEM 用ス

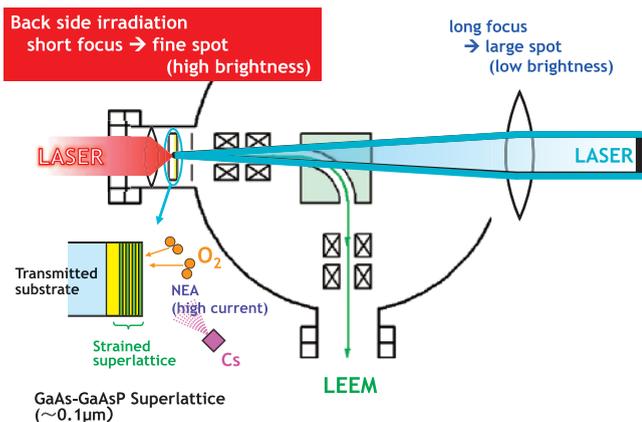


図2 カソードの前面と背面からレーザを照射する場合の模式図。背面照射の場合はカソードの背面から2 mmのところに光学レンズをおくことが出来、約1.3 μmのビーム系が得られている。前面から照射した場合は、レンズとカソードの間の距離が長くレーザ径が小さくならない^{23~26}。

ピン偏極電子銃の大きな問題点は、1) カソードに GaAs バルク結晶を使用しているために最大で50%のスピンの偏極度しか得られず、非弾性散乱や欠陥による電子の散乱のために強い減偏極作用が生じ、実用的には20–25%の偏極度で使用されてきた。これはコントラストの低下をもたらす。2) 輝度が十分でないために、強度が充分に得られないため S/N 比が低くなり、一画像を得るのに長時間(2枚の画像を得るために5–30秒程度)必要であるということを意味している。そのために実時間観察は不可能であった。3) カソード表面を負の電子親和力を持った状態(NEA表面)にして仕事関数を低下させることが、電子ビームを得るためには必須である。市販品ではNEA表面の寿命が3–4時間しかなく、実質的に実験を行うのが難しかった。

まず1)の問題を解決するために「歪み超格子」(GaAsとGaAsPのペアを積み重ねたもので基板はGaPを使用)を使用した。スピンの偏極度は大幅に改善され90%になった。この詳細については桑原等による本特集の解説²⁸⁾に詳しく記されているのでここでは説明を略す。2)の問題に対してはレーザ光を背面から照射することにより克服した。前面照射ではスピンの偏極マニピュレータ(スピンの方向を垂直方向に変えるデバイス)や電子光学系があるためにレンズとフォトカソードの間隔が60–70 cm必要であった。背面照射することにより、その距離を2 mmまで短くすることが出来、超高輝度を達成した。輝度は 1.3×10^7 A/cm²・srである。市販品に比べて10,000倍以上向上した。またLaB₆に比較しても桁程度大きな値を持っている^{20~23)}。背面照射の概念図を図2に示す。3)の問題を克服することは実験を行う上で大変重要である。NEA表面を得るためには通常CsとO₂を使用して表面に強い電氣的なダイポールを作り仕事関数を低下させる。Csはアルカリ金属なので非常に活性である。NEA表面を長く維持しようと思えば、超高真空(UHV)では不十分で極高真空(XHV, 10⁻¹⁰ Pa オーダ以下)が必要になる。

カソードがある電子源部は電子線が出ている状態でもXHVを保つことが重要である。かつ放出した電子がアノード等の電極にあたることにより、電子衝撃脱離で原子や分子を放出し、その原子や分子が電子ビームでイオン化され、電子とは逆にカソードに向かい損傷を与える。このような損傷を避けるために市販の電子銃とは全く逆の発想を行った。市販の電子銃では、カソードとアノード間に損傷を軽減するために低い引きだし電圧をかけている。しかしこのようにすると放出された電子がアノードにあたり原子や分子を脱離させる。電子ビームでイオン化され、カソードに衝突し損傷を与え寿命を短くする。我々は逆に高電圧をかけることにより、レンズ作用を強くして放出された電子がアノードにあたることなく次の電子光学系に行くようにした。このことは電子が放出されたことによるアノード等からの原子や分子の放出がないことになる。これがカソードのNEAの寿命を飛躍的に向上させた。市販の電子銃ではせいぜい3–4時間であったが、新開発の電子源のNEA表面の寿命は2か月以上の寿命を持つにいたった。今まで物性研究を行うために世界中の多くの研究機関で「スピンの偏極電子銃」の開発が行われてきたが、多くはその開発を断念せざるを得なかった。その理由はひとえに「寿命」である。Bauer教授のグループはその寿命を1日に改善することにより、実験を行ってきた。NEA表面が劣化してきた場合には、カソードの温度を上げるだけで簡単に表面の清浄化が出来る。そうすると再びアクティベーションを行い使用することが可能になる。最近まで使用したカソードは2年以上使用したが、大きな劣化はなかった。

また、この電子銃を使用する場合、レーザ光の偏光を偏光板により円偏光から直線偏光(逆も可)に切り替えることにより磁区像の観察からすぐにLEEM像(電子顕微鏡像)の観察に切り替えることが出来る。従って、LEEM像観察に使用していたLaB₆等の電子源は不要だということになる。またLEEM像と磁区像を同じ視野ですぐに観察することが出来ることも意味しており、表面の状態と磁区がどのような関係にあるか議論が出来ることになる。高い空間分解能でこのような観察が簡単にできることは磁性材料の性質をより詳細に研究できるということの意味している。

またこのカソードから放出される電子のエネルギー幅は電界放出電子源に比べても小さいことが期待されている。スピンの偏極電子銃として使用するだけでなく、高エネルギー分解能電子銃としても使用が期待できる。

4. 試作した超高輝度・高偏極・長寿命 SPLEEM

図3に試作した電子銃を装備したLEEMの写真を示す。右の方に試作したスピンの偏極電子銃があり、左の方にSPELEEM(スペクトロスコピックLEEM: エネルギー分析可能なLEEM)がある。中間には市販のスピンの偏極電子銃ならびにLaB₆電子銃(装置の背面になっていて見えない)がある。スピンの偏極電子源チャンバの真空をXHVに保ったり、スピンの方向を制御するスピンマニピュレータを備えて

Novel spin-polarized electron gun

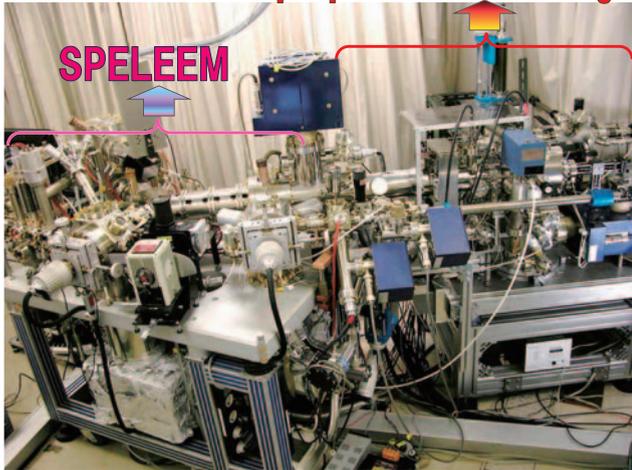


図3 試作したスピン偏極電子銃を装備した低エネルギー電子顕微鏡 (SPLEEM). 左側はエネルギー分析可能なスペクトロスコピック LEEM (SPELEEM) で右側にスピン偏極電子銃がある。

いるためにスピン偏極電子銃のサイズが少し大きくなっている。現在新しいプロジェクトで小型化を行うために開発を進めている。電子スピンの方向を三次元方向に制御するために「スピンマニピュレータ」と「スピンローテータ」という2種の機器を使用しているが、これを多極子ウイーンフィルタにより一つの機器で三次元にスピン方向を変えることができる。三次元スピンマニピュレータ (3D spin manipulator) と呼んでいる。これは新しい考え方に基づくもので、現在順調に三次元のスピン方向の制御ができている³⁰⁾。

5. 磁区の実時間観察

このようにして開発した電子銃を搭載した SPLEEM により、実際に磁区を観察した例を示す。図4は W(110) 上に Co を積層して得た磁区像である。信号取得時間に対して得られた像を示している。すでに述べたように2枚の像を得ることにより1枚の磁区像を得ている。信号取得時間が0.02秒でもはっきりと磁区像が観察されている。市販のスピン偏極電子銃を使用した場合と比較すると実に200倍以上早く像が得られていることになる²³⁾。ビデオレートが約0.03秒であるから、それより早く像取得が行われており、実時間観察が実現したことを示している。それより長い取得時間では像の S/N 比があがり、さらに鮮明な像になっている。実際に映画のように Co の蒸着に応じて磁区が変化していく様子が撮影されている。実時間で観察されるために磁区の変化を詳細に知ることが出来、刻々変化する材料の特性に関するより詳しい議論が可能になる。

6. スピントロニクス薄膜材料への応用

6.1 [CoNi_x]_y 薄膜層の磁区特性の観察

開発した SPLEEM を実際の薄膜材料の観察に応用した。

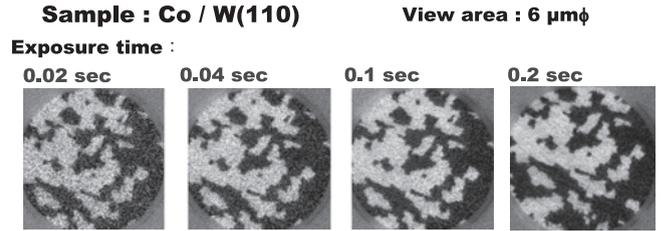


図4 超高輝度・高偏極・長寿命 SPLEEM で得られた Co/W(110) の磁区像。画像取得時間0.02秒でも磁区像が得られていることが分かる。実時間観察が出来ることを示している²⁶⁾。

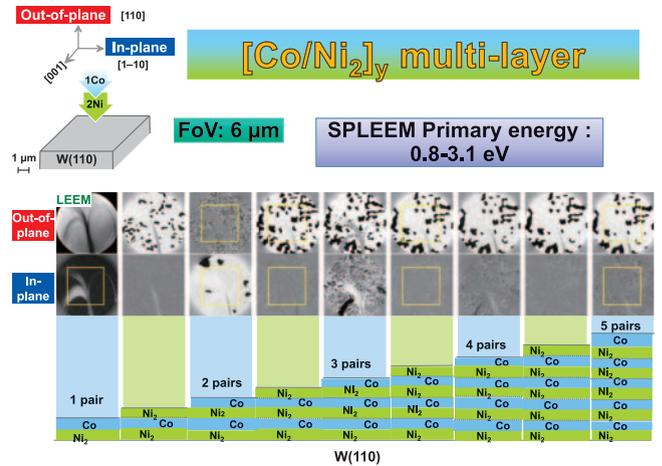


図5 [CoNi₂]_y/W(110) 多層膜の LEEM 像ならびに SPLEEM 像。4ペア目が終了するまでは、各層ごとの磁化特性が大きく変化している。その後は一貫して垂直磁化構造が強くなっている³⁰⁾。

すでに述べたように「電流磁場方式」の次に来るモデルが盛んに提案されている。「STT方式」はその候補の一例である。電流により磁壁を移動させることにより、磁区の特性を変化させメモリデバイスに応用しようというものである。磁壁の移動が電流密度に依存するために素子を微小化した場合でも電流が大きさに応じて小さくできるということが大きな長所とされている。実際に IBM や NEC がこのような考え方にもとづいたメモリデバイスを提案している^{14,15)}。理論的な提案は Berger によりなされたが¹³⁾、微小ワイヤーを用いたパイオニア的な実験が京都大学の小野グループにより行われた¹⁴⁾。その後垂直磁化材料を用いた方が電流密度の閾値を下げる事が出来るということが明らかにされた。小野グループと NEC は垂直になる薄膜材料を探索した結果、[CoNi_x]_y 多層膜を提案した¹⁵⁾。実際には [CoNi₃]_y を数層以上重ねた多層膜で安定な垂直磁気異方性が得られるという報告をしている。ここでは W(110) 表面上の [CoNi_x]_y の成長に伴って薄膜の磁区特性が変化する詳細な観察を行った。入射電子線のスピン方向を3次元方向に自由に制御できるので、垂直ならびに面内の複数の方向に入射スピンの方向を制御して観察した。図5にその実験結果を示す²⁷⁾。試料は [CoNi₂]_y である。[CoNi₂]_y は種々の組み合わせで実験を行った結果最も強く垂直磁気異方性を示すことが分かったので採用した。その結果、

1ML Co/2ML Ni/W(110)

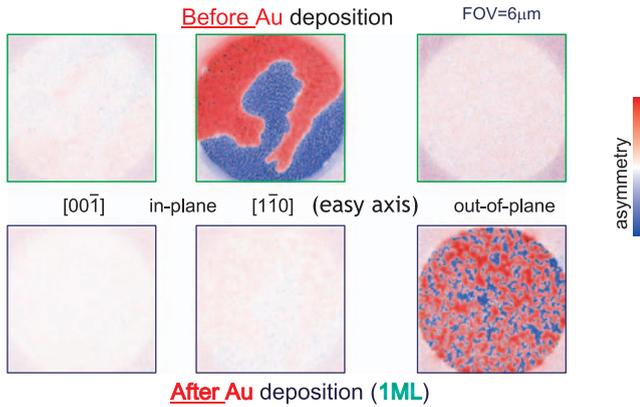


図6 CoNi₂/W(110)の磁区像(面内2方向と面直)ならびに一原子層 Au/CoNi₂/W(110)の磁区像。一原子層の Au で面内から垂直に磁区が変化している様子が分かる。動画のスナップショットの一部を示したものである³⁰⁾。

1 ペア形成後に2原子層の Ni が形成したあとは強い垂直方向の磁区が形成される。しかしその後 Co を一原子層形成させると垂直磁化はほとんどなくなり強い面内磁化が現れる。4 ペア形成後は表面が Co であっても Ni であっても安定した垂直磁化が現れる。この様子を動画を使って観察すると、垂直と面内磁化が交互に現れる段階では、2原子層の Ni が約20-25%程度で急に垂直磁化に変化することが分かる。また膜のペアが増加すると垂直に変化が始まる膜厚も増加することも分かった。磁区の形状がドラスティックに変化する様子もつぶさに観察することが出来る。垂直磁化が生じる場合には比較的大きな磁区が生じているが、面内磁化が強い場合には小さなサイズの磁区が生じていることが分かる。これらのことからある程度厚い [CoNi₂]_y が形成すると安定な垂直磁化が現れ、電流密度の閾値が下がることが期待できることを示している。

これら一連の実験結果は、お茶の水大学の工藤和恵等により、LLG (Landau-Lifshitz-Gilbert) 方程式をもとにしたシミュレーションにより再現された²⁹⁾。実験結果をうまく再現している。また、実験で観察された磁壁についてもシミュレーションで鮮やかに示されている。

6.2 一原子層の Au 原子形成による磁区構造の変化

[CoNi₂]_y では4ペア以上で安定な垂直磁化が得られることを示したが、もっと少ないペアで他の元素を使用して垂直磁化が得られないか確認を行った。すでに Duden と Bauer が Co/W(110) 上に Au を形成させたときに最高60-70%の割合で垂直磁化が得られることを報告している³¹⁾。そこで [CoNi₂]/W(110) 上に一原子層の Au を形成させた。[CoNi₂]/W(110) では強い面内磁化を示すが、わずかに一原子層の Au を形成するだけで強い垂直磁化に変わることが確認された。図6にその様子を示した。[CoNi₂]/W(110) の面内磁化は [1-10] 方向を向いており、[00-1] には磁化はない。かつ垂直方向にも磁化はないが、一原子層の Au ではほぼ100%垂直に磁化が変化し

ていることを示している。この変化を動画で観察すると変化の様子が詳細に見て取れる。このようなドラスティックな変化は界面での磁気異方性によると思われる。しかし、LEED パターン等を観察するともう少し詳細なプロセスが推察できる。まず面内磁化が強い場合は磁区のサイズが大きい。Au 層が形成するにつれて垂直磁化が強くなっていくが、その磁区のサイズはかなり小さい。このことから考えても面内磁化を持つ磁区がそのまま垂直磁区に移行するのではないことが分かる。LEED パターンを観察すると Au の蒸着の初期には Au に起因する LEED スポットは現れない。このことは Au が二次元の島を形成しているのではなく、ガスのようにアモルファス上になっていることが分かる。蒸着が進むにつれ、比較的急に Au に起因するスポットが現れ、位置がシフトしながら強度が大きくなっていく。このことは二次元の Au のクラスターが形成していることを示している。この形成された二次元のクラスターが界面の磁気異方性に寄与し、強い垂直磁化を生じさせていることが理解できる。また LEEM を観察していると、強くステップパンチをしている領域とフラットなテラスが広がる領域が混在している様子が分かる。しかし、このステップパンチと磁区の形状にはほとんど相関性がない。このことは表面の欠陥であるステップが、磁区の形成に大きく寄与していないことが分かる。LEEM 像、LEED パターンを得ることでより詳細なプロセスを知ることが可能である。実際の理論的な解析は現在理論グループとともに解析を行っているところである。

このように薄い [CoNi₂] 膜でも異種元素を使うことにより垂直磁化を得ることが出来ることは、STT デバイスを作製するときに Au をキャップ物質として使用して特性を変えることに寄与させることが可能であることを示唆している。他の元素にもこのような特性を有するものが存在すると考えられるのでその詳細を調べることは今後重要であると考えられる。

*共著者である中西疆名古屋大学名誉教授は素粒子の分野での新粒子発見に重要な高性能スピン偏極電子銃の開発に多大の貢献をしてこられた。そのベースをもとに3グループ(中西、竹田、越川グループ)によるスピン偏極 LEEM の開発が行われた。幸いにも、その性能の高さは世界的にも認められている。開発に多大の貢献をして来られた中西名誉教授は残念ながら2012年12月に病のために逝去された。ご冥福をお祈りしたい。

謝 辞

スピン偏極電子銃の開発には共著者以外にも多くの方々がお手伝いしてきた。共著者以外の名前を上げると以下のとおりである。

中西グループは電子銃のデザインならびに製作を担当した。貢献したのは、名古屋大学の中川靖英氏、許斐太郎氏、真野篤志氏、山本尚人氏、桑原真人特任講師、奥見正治氏、

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の山本将博氏, 株式会社日立製作所 中央研究所の孝橋照生氏, 大嶋卓氏, 大同大学の坂貴教授, 大同特殊鋼株式会社の加藤俊宏氏, 大阪府立大学の堀中博道教授で, 感謝の意を表したい。

竹田グループはカソードの製作を行った。貢献したのは, 名古屋大学の金秀光特任助教, 宇治原徹教授である。感謝の意を表したい。越川グループは電子光学系の計算, LEEM への取り付け・調整・評価ならびに実際の磁性薄膜を使った実験を担当した。電子光学系のシミュレーションや実際の調整ならびに実験を実行するにあたっては大阪電気通信大学エレクトロニクス基礎研究所・客員研究員津野勝重氏, 橋本道廣氏の貢献があった。感謝の意を表したい。

本研究を遂行するにあたって主に JST 先端計測分析技術・機器開発 (要素技術) (No. 19201022) (2005–2009 年度) の補助を受けた。引き続き JST 産学イノベーション加速事業, 先端計測分析技術・機器開発 (機器開発) (2010–2013 年度) の補助を受けて小型スピンの偏極電子銃の開発を続けている。それ以外に日本学術振興会・学術創成研究費 (No. 13GS0022) (2001–2005 年度), 科学研究費補助金基盤研究 A (2007–2010 年度), 基盤研究 A (2011–2013 年度) のサポートも受けているので謝意を表する。

文 献

- 1) Bauer, E.: *Rep. Prog. Phys.*, **57**, 895 (1994)
- 2) 越川孝範: 顕微鏡, **41**, 189 (2006)
- 3) 越川孝範: 応用物理, **79**, 1108 (2010)
- 4) 越川孝範, 中西 彊, 竹田美和: まぐね, **6**, 314 (2011)
- 5) Mankos, M., Adler, D., Veneklasen L. and Munro, E.: *Surf. Sci.*, **601**, 4733 (2007)
- 6) Uchikawa, Y., Kojima, M., Ichihashi M. and Maruse, S.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **8**, 436 (1969)
- 7) 市ノ川竹男: 日本結晶学会誌, **24**, 385 (1982)
- 8) Bauer, E.: *Ultramicroscopy*, **17**, 51 (1985)
- 9) Telieps, W. and Bauer, E.: *Ultramicroscopy*, **17**, 99 (1985)
- 10) Bauer, E.: *J. Phys. Cond. Matt.*, **21**, 314001 (2009)
この論文に開発の歴史についての記述がある。
- 11) 宮崎照宣, 水上成美, 渡邊大輔, Feng Wu: まぐね, **5**, 164 (2010)
- 12) 石綿延行, 深見俊輔, 鈴木哲広, 大嶋則和, 永原聖万, 三浦貞彦, 杉林直彦: まぐね, **5**, 178 (2010)
- 13) Berger, J.: *Phys. Rev. Lett.*, **B54**, 9353 (1986)
- 14) Yamaguchi, A. *et al.*: *Phys. Rev. Lett.*, **92**, 077205-1 (2004)
- 15) Koyama, T. *et al.*: *Appl. Phys. Express*, **1**, 101303 (2008)
- 16) Parkin, S.S.P., Hayashi, M. and Thomas, L.: *Science*, **320**, 190 (2008)
- 17) Numata, H., Hayashi, M., Oshima, N., Fukami, S., Nagahara, K., Ishiwata, N. and Kasai, N.: VLSI Tech. Symp. Tech. Dig., 232 (2007)
- 18) Gerhard, J. *et al.*: *Nature Nanotechnology*, **5**, 792 (2010)
- 19) Maruyama, T. *et al.*: *Nature Nanotechnology*, **4**, 158 (2009)
- 20) Jin, X.G. *et al.*: *Appl. Phys. Express*, **1**, 045002 (2008)
- 21) Yamamoto, N. *et al.*: *J. Appl. Phys.*, **103**, 064905 (2008)
- 22) Jin, X.G. *et al.*: *J. Cryst. Growth*, **310**, 5039 (2008)
- 23) Suzuki, M. *et al.*: *Appl. Phys. Express*, **3**, 026601 (2010)
- 24) Duden, T. and Bauer, E.: *Rev. Sci. Instrum.*, **66**, 2861 (1995)
- 25) Nakanishi, T. *et al.*: *Phys. Lett.*, **A158**, 345 (1991)
- 26) Nishitani, T. *et al.*: *J. Appl. Phys.*, **97**, 094907 (2008)
- 27) Suzuki, M. *et al.*: in preparation to be submitted.
- 28) 桑原真人, 中西 彊, 竹田美和, 田中信夫: 顕微鏡, **48**, 3 (2013)
- 29) Kudo, K. *et al.*: in preparation to be submitted.
- 30) JST 産学イノベーション加速事業, 先端計測分析技術・機器開発 (機器開発) (2010–2013 年度) (リーダー: 越川孝範)
- 31) Duden, T. and Bauer, E.: *Phys. Rev.*, **B66**, 468 (1999)