

Spin polarized electron source technology transferred from HE accelerators to LE electron microscopes

Tsutomu Nakanishi^{1,A)}, Atsushi Mano^{A)}, Yasuhide Nakagawa^{A)}, Makoto Kuwahara^{A)}, Shoji Okumi^{A)}, Naoto Yamamoto^{B)}, X. G. Jin^{B)}, Toru Ujihara^{B)}, Yoshikazu Takeda^{B)}, Masahiro Yamamoto^{C)}, Michihiro Hashimoto^{D)}, Masahiko Suzuki^{D)}, Tsuneo Yasue^{D)}, Takanori Koshikawa^{D)}, Takashi Saka^{E)}, Toshihiro Kato^{F)}, Hiromichi Horinaka^{G)}

^{A)} Graduate School of Science, Nagoya University, Nagoya 464-8602, Japan

^{B)} Graduate School of Science, Nagoya University, Nagoya 464-8602, Japan

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba 305-0801, Japan

^{D)} Fundamental Electronics Research Institute, Osaka Electro-Communication University, Osaka 572-8530

^{E)} Daido Institute of Technology, Nagoya 457-8531, Japan

^{F)} Daido Steel Co. Ltd., Nagoya 457-8531, Japan

^{G)} Faculty of Engineering, Osaka Prefecture University, Osaka 599-8531, Japan

Abstract

For more than 25 years, our group has developed the technology of spin-polarized-electron-source (PES) for a future linear collider project (ILC). Various new techniques for achieving high polarization, high quantum efficiency, high current density, sub-nanosecond multi-bunch generation etc. were developed. Two fundamental technologies; 1) reduction of dark current and 2) preparation of extremely high vacuum environment for preserving the NEA (Negative Electron Affinity) surface have been also developed. Using these PES technologies and a new transmission type of semiconductor photocathode, we recently succeeded in producing the high brightness and high polarization electron beam for the low energy electron microscope (LEEM). Our Spin-LEEM system enables the world-first video-observation (≥ 10 pictures/sec) of the surface magnetic domains of evaporated Co on the W (110) substrate with ~ 20 nm space resolution.

スピン偏極電子源の表面電子顕微鏡への応用と実用化の達成

1. はじめに

筆者ら名古屋大学の研究グループは1980年代中頃からGaAs系半導体を円偏光レーザーで照射する光励起偏極機構と負の電子親和性(NEA)表面を用いた真空中への放出機構を組み合わせた方式のスピン偏極電子源の開発をスタートさせた。特に1990年からはリニアコライダーでの偏極電子ビームの実現を目指し、半導体フォトカソードや電子銃に工夫を凝らして、スピン偏極度、量子効率、電流密度、

サブナノ秒マルチバンチ生成³⁾等いくつかのビーム性能限界を突破する新しい手法を提案しその有効性を世界に先駆けて実証してきた。特にビーム引き出しを担うNEA表面放出機構を長時間保持する電子銃技術として、電極間暗電流の削減、極高真空環境を実現できるノウハウも蓄積してきた。表-1に名大グループが手作りしたフォトカソードと200keV電子銃によって実現できた最高ビーム性能について実験条件とともにまとめてある。これらの性能値は名大製の200keV偏極電子銃がリニアコライダー加速器の求める要求仕様をすべてのビーム説明項目で

満足する能力を持つことを示している。

2005年度より日本科学技術振興機構の支援を受け、名古屋大(理学研究科+工学研究)と大阪電通大の共同研究グループは、リニアコライダー用技術開発で培った偏極電子ビーム技術を物性研究用の電子顕微鏡分野へ活かすプロジェクトを推進している。この応用ではビーム輝度向上が目標となったが、レーザー照射方式を結晶背後から行う透過光吸収型フォトカソードの導入により、**従来型のビーム輝度を1000倍以上に明るくすることに成功した**。この偏極電子源の威力は、これを搭載したSpin-LEEM顕微鏡により、基板に蒸着する磁性金属の最表面層の磁区構造の動的変化を世界に先駆けてリアルタイムで観測できたことにより証明された。本稿ではこの実験装置の製作手法とデータ取得方法を中心に紹介する。

¹ E-mail: nakanisi@spin.phys.nagoya-u.ac.jp

スピン偏極度	~90%	GaAs-GaAsP歪み超格子薄膜フォトカソード (~780nm)	Ref.1)2)
量子効率	~0.5% ~10%	GaAs-GaAsP歪み超格子薄膜フォトカソード (~780nm) バルクGaAs結晶フォトカソード (~633nm)	1), 2)
ピーク電流	~12A	200keV電子銃、バンチ幅1ns、バンチ電荷6nC	4), 8)
電流密度	≥50mA/mm ²	同上ピーク電流、レーザースポット径17mm	4), 8)
到達真空度	~6×10 ⁻¹⁰ Pa	200keV電子銃のNEA表面フォトカソード近傍で測定	4), 8)
NEA表面寿命	≥120h	200keV電子銃、一定電流50 μ A引き出し時	4), 8)
電極間・暗電流	≤1nA	Mo陰極+Ti陽極、陰極表面最大電界7.8MV/m、カソード表面電界3.0MV/m	4), 8)

表 - 1 : リニアコライダー用200keVスピン偏極電子源で達成されたビームおよび装置性能

2. 高いビーム輝度をめざす実証機の製作

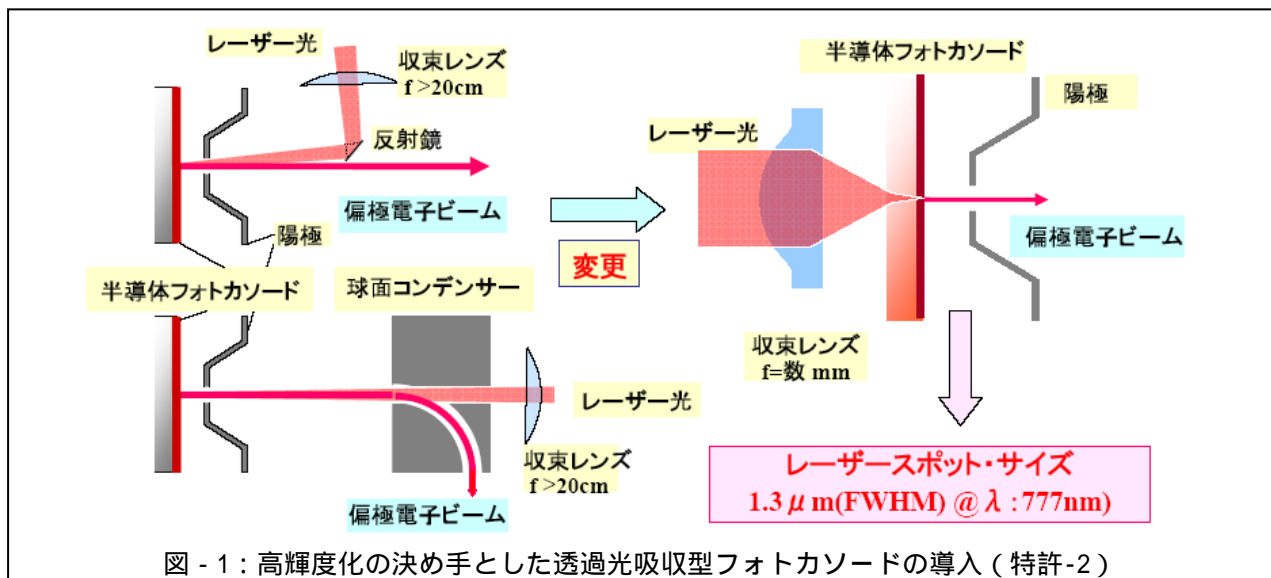
電子顕微鏡ビームの特徴はレーザー光のような高輝度ビームであり、そのためには電子源サイズを小さくせねばならない。ところがすでに実用化されている偏極電子源では図 - 1の左側に示すごとく、レーザー光を電子ビームを取り出すフォトカソード

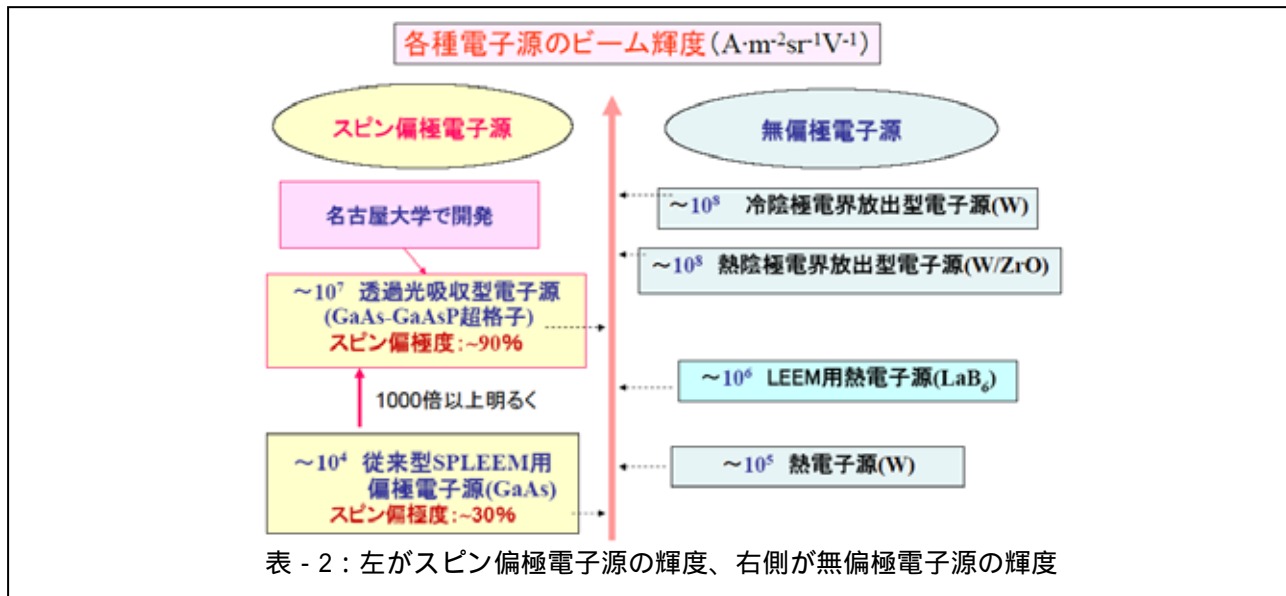
の前面から入射する方式を用いるために、収束レンズの焦点距離を充分長くとる必要があり、フォトカソード上のレーザースポットを100 μ m 以下に絞ることが難しい。そこで筆者らは、右側に示す透過光吸収フォトカソード(背面照射)方式により、これを光の回折限界近くの数 μ m 以下にすることを提案した⁵⁾(特許 2)。この方式の有効性は20keVスピン偏極電子銃によって実証され、偏極電子ビームの輝度は、5.3μAを引き出した電子源でのビームサイズ1.5μm (HWHM) が53cm下流では1.0mmに広がった実験結果を用いて、還元輝度にして~1.0×10⁷A/(cm²·sr·V)となることが判明した。表-2には、この輝度値と無偏極を含む各種電子源の輝度とを比較してある

表 - 2が示すように、名大製スピン偏極電子源の輝度は従来型の1,000倍以上も明るくなった。さら

に電子顕微鏡で多用されるLaB₆エミッター電子源の輝度も1桁ほど上回っており、「スピンを使うと輝度が大きく低下してしまう」という従来からの“常識”は完全に過去のものとなり、逆に、輝度の点でもこのスピン偏極電子源の方が有利であることが実証できた。

なお、スピン偏極度についてもGaAs基板の上にGaAsPバッファ層、さらにGaAs-GaAsP歪み超格子薄膜をMOCVD成長法で積む従来型フォトカソードに優るとも劣らぬ~90%を得ることができた。透過光吸収フォトカソードにするために780nmレーザー光を透過させるGaP基板を用い、その上には超格子層にかける歪みを従来型と同じ引っ張り型(クラック状の格子欠陥ができる)にするためにGaAs中間層をバッファ層との間に挿入する工夫^{6,7)}(特許-2)が活きた結果である。このように歪みのタイプで格子欠陥のおき方が異なり、それがスピン減偏極の多寡を決めることが明白に出来たのも重要な知見であった。なお、この透過光吸収型フォトカソードの試作は竹田研究室のMOCVD装置を用いて作成されたものである。





3. スピン表面電子顕微鏡 (SPLEEM) による磁区構造の動的観察

この偏極ビーム源を金属基板上に異種の金属を蒸着する過程での最表面層の動的観察を得意とする低エネルギー電子顕微鏡 (LEEM) に応用した。この研究を始める契機を与えた越川孝範グループの大阪電通大のLaB₆エミッター電子源を用いたLEEM装置 (ドイツELMITEC社製) においては、20keVエネルギーに加速した電子ビームを試料直前で $\sim 1eV$ レベルに落とし、試料表面から真後ろに散乱された電子をエネルギー分解したあとにCCDカメラで画像として撮影する。低エネルギー条件では金属表面からの反射率が高いので動的に変化してゆく最表面層の形態的情報をリアルタイムで把握することが可能となる。

スピン偏極電子ビームを用いると、この形態的情報に加え、試料金属のスピン磁区構造の変化が

観察できるという大きな利点が生ずる。ところが従来は偏極ビームの輝度が余りにも低いため、磁区構造観察が可能となることは実証されていたにもかかわらず、悲しいかな、LEEMの特徴である動的観察は不可能となっていた。この状況を一変させたのが、我々が作製したSPLEEM電子銃 (図 - 2) であり、 $\sim 90\%$ 偏極度の $\sim 5 \mu A$ 電子ビームを生成する能力があることを事前の性能試験で確認できた。この電子銃は2008年12月に大阪電通大のLEEM顕微鏡に接続され、現在も装置の調整と改良を進めているが、この段階でもすでに世界に先駆けて動的観察が実現可能となることが判明した。

図 - 3に、タングステン(W)基板の上にコバルト (Co)を蒸着する過程の最表面層を視野径 $30 \mu m$ で観察した画像を示す。この実験では偏極ビームのスピン・ベクトルを試料表面上に寝かせてある。このスピンの向きが互いに反転関係にある2枚の画像を撮り、その「差」をon-line計算するとスピン効果情報のみが、また、その「和」を計算するとLEEM画像となり形態的情報のみが抽出できる。図のモザイク模様の磁区構造は、画像取得時間が0.04秒でもすでに確認できるが、0.1秒だと鮮明な画像となることがわかる。従来型の偏極電子源ではこの画質を得るのに10秒以上を費やしたが、この時間を1/100以上も短縮できたことにより、我々は磁性薄膜形成過程の動的観察が世界に先駆けて可能になった瞬間を経験することができた。

SPLEEM装置全体はまだ調整途上にあるにもかかわらず、小規模のレーザー照射による $0.8 \mu A$ 程度の電流でも動的観察が可能になったのは、高性能化された名大製スピン偏極電子源の賜物である。

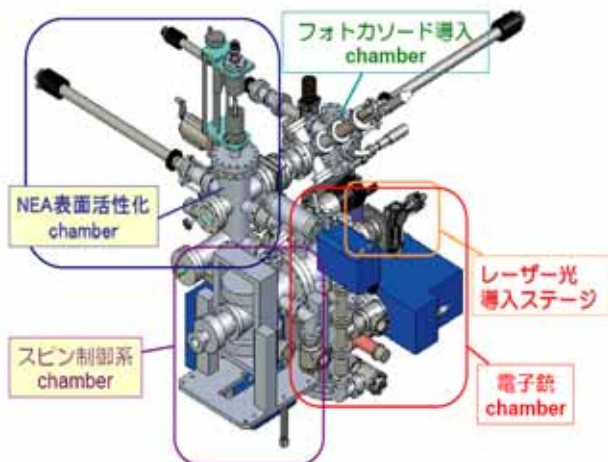
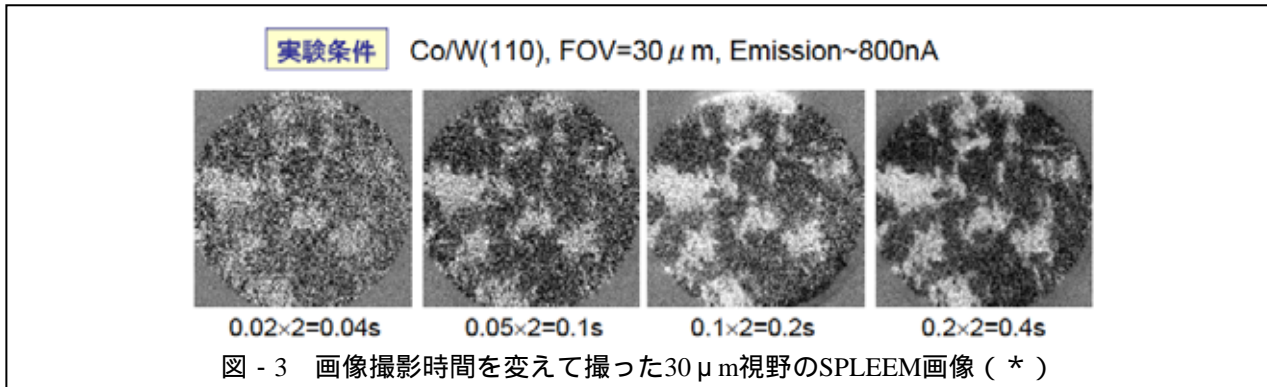


図 - 2 : SPLEEM用20keV偏極電子銃システム



4. まとめ

SPLEEMによる磁区構造の動的観察をめざした研究は、JST（日本科学技術振興機構）の「先端計測分析要素技術開発プログラム」の1テーマとして、中西を代表者として推進し、共同発表者である名大・理学研究科、名大・工学研究科、大阪電通大、大同工業大学、大同特殊鋼、大阪府大、および、日立中研（大嶋卓、孝橋照生）のそれぞれの貴重な専門的寄与により、とりあえず当初目標（スピン偏極電子源の高輝度/高偏極度化およびSPLEEM顕微鏡における動画像観察の実現）に到達できた。この機会にこの場を借りて、このプログラム推進に当たり本河光博研究統括を初めとするJST関係者の多くの激励と支援に感謝したい。

今後のSPLEEM顕微鏡の開発は大阪電通大グループを中心に、S/Nの良い高品質画像を高速取得するためのノウハウを蓄積してゆく予定である。さら

にその先の計画として、動画像観察でしか解明できない磁性体現象への応用を目指す予定である。

一方、スピン偏極電子源自体の今後の開発予定としては、現在、JST支援を受け「貸し出し可能なデモンストレーション用の20keV偏極電子源装置」を製作中であり、SPLEEM以外にも、スピン逆光電子分光やスピン透過型電子顕微鏡などのスピン計測実験装置への偏極電子ビームの導入に興味を持たれる物性研究者と連携しつつ、それぞれの装置での実用化を目指す方向での技術展開に弾みをつけたいと考えている。

なお、本稿ではNEA放出機構を守る技術など偏極電子源を設計・製作するために必要な技術の中身については触れることができなかった。興味のある方は参考文献に挙げた解説記事^{8),9)}を読んでいただければ幸いです。

[参考文献]

- 1) T. Nakanishi, K. Togawa et al. *Nucl. Instr. and Meth.* A455 (2000), p109-112,
- 2) T. Nishitani, T. Nakanishi et al. *J. of Appl. Phys.* 97 (2005), 094907
- 3) K. Togawa, T. Nakanishi et al. *Nucl. Instr. and Meth.* A414 (1998), p431-445
- 4) M. Yamamoto, T. Nakanishi et al., to be published in *JJAP*、及び、
山本将博：博士論文（2009年度、名古屋大学理学研究科）
- 5) N. Yamamoto, T. Nakanishi et al. *J. of Appl. Phys.*, vol.103, No. 6 (2008), 064905
- 6) X. Jin, N. Yamamoto et al. *Appl. Phys. Express* 1 (2008), No. 4, 045002,
- 7) X. Jin, Y. Maeda, et al. *J. of Crystal Growth* 310 (2008) p5039-5043
- 8) 中西 彊：科研費A成果報告集「超低エミッタンス電子源の開発」（2008年11月作成）
- 9) 中西 彊：顕微鏡44 (2009), No. 2, p103-110、表面科学29-11 (2008) p672-681、
加速器2-2 (2005) p211-217

[注釈]

(*) この画像は、2009年3月6日に大阪電通大のSPLEEM顕微鏡で撮影されたもので、我々の高輝度/高偏極度・電子源によりSPLEEM動画像観察が可能となったことを初めて確認したものである。

[特許]

- 1) 中西 彊、他5名、出願番号：H10-257983、「歪み超格子 GaAs-GaAsP 構造を用いる偏極電子線源」
- 2) 中西 彊：特開 2007-258119（名古屋大学）「スピン偏極電子発生装置」
- 3) 宇治原 徹、他6名：特願 2008-079292（名古屋大学）「スピン偏極電子源」