

「量子効果等の物理現象」  
平成7年度採択研究代表者

武笠 幸一

(北海道大学大学院工学研究科 教授)

## 「スピン計測 - スピンSPMの開発とスピン制御 - 」

### 1. 研究実施の概要

電子についての従来の視点：質量、電荷から脱却して「スピン」の視点で考える新分野、すなわちスピンの関与する量子現象を積極的に用いた新世界を切り拓くことを目的とする。第1に、探針の試料に対する影響の少ない光励起GaAs探針を用いたSP-STMを開発してきた。MgO単結晶基板上のFeエピタキシー超薄膜でスピン偏極像の観察に成功した。第2に、交換相互作用力顕微鏡の実験条件を知るために第1原理計算を行い、これに基づき反強磁性NiO単結晶劈開面で検証実験を行い、NC-AFMで原子像を確認した。第3に、Cu(001)上のFe超薄膜について磁性と基板モルフォロジーの関係を調べている。第4にGaNナノ構造の自発的スピン偏極、水素表面からの水素脱離におけるスピン偏極状態を分子軌道法から検討してきた。

### 2. 研究実施内容

#### 1) 研究目的

電子についての従来の視点：質量・電荷から脱却して「スピン」の視点で考える新分野、すなわちスピンの関与する量子現象を積極的に用いた新世界を切り拓くことを目的とする。

#### 2) 本年度までの成果

#### ・スピンSPMの開発

##### 〔1〕 SP-STMの開発

我々は、探針の試料に対する影響の少ない光励起GaAs探針を用いたSP-STMを開発してきた。問題点を探針、試料、検出システムについて分けて検討を行った。探針としては主としてGaAs薄膜劈開探針を用いた。本年標準的試料となり得るFe/MgO(001)の製作に成功した。市販の研磨MgO基板では面粗さ約0.1nmで明確なステップ、テラスは見られないが、これを劈開した表面では<001>方向にモノレイヤーのステップから約10nm高さのステップおよびテラス幅10~400nmの非一様のテラスが観察された。さらに研磨基板を予め約800℃、酸素雰囲気中でannealすると<011>方向

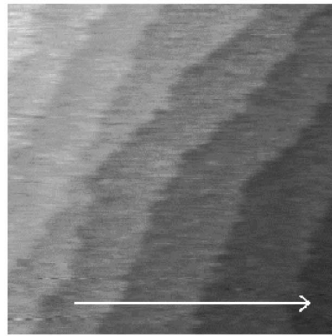


図 1

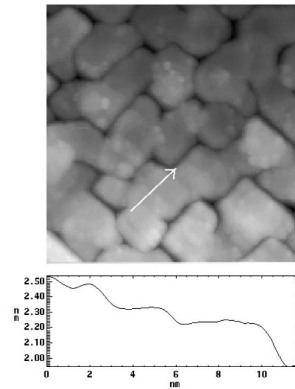


図 2

にモノレイヤーのステップおよび数百nmのテラスのある平らな表面が得られた(図1)。この表面にFeの薄膜を数nm蒸着すると大きさ約10nmのアイランド構造で結晶軸が正確にそろったエピタキシャル薄膜が得られた。<sup>(1)</sup>図2にanneal基板上的Fe薄膜のトポ像を示すが、成長温度が高くなるに従い方位のそろった結晶粒が次第に角形になっていくのが分かった。270

を越えると角のとれた結晶粒となり、この状況は磁性とよい対応がつく。これらアイランド構造Fe薄膜に対し、スピン偏極像が得られた。<sup>(2)</sup>図3(a)のトポ像に対し、図(b)に同じ場所でのスピン偏極像を示す。量子化軸は写真上下方向である。電流に対応してスピン偏極度をコントラストで示すが、場所により偏極度の符号が異なっていることが分かる。更に精度の高い実験を現在行っている。

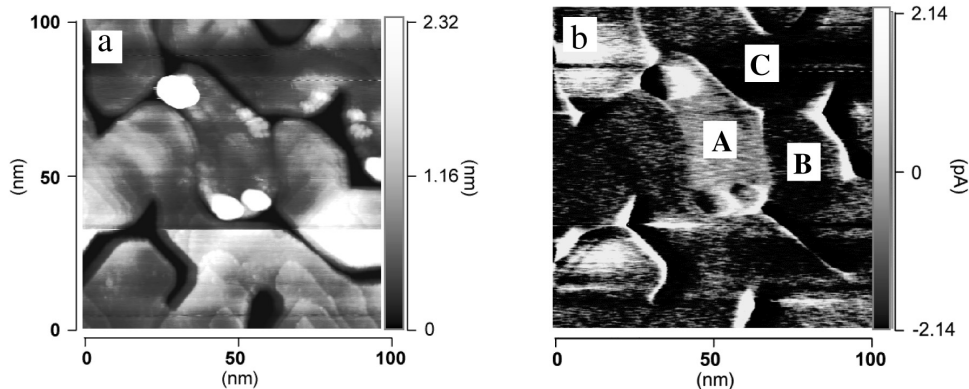


図 3 (a)単結晶のMgO(001)上のFe(001)エピタキシャル膜のトポ図  
(b)円偏光励起のGaAs薄膜劈開探針によるFe(001)エピタキシャル膜のスピン偏極像

〔 2 〕 交換相互作用力顕微鏡 ( EFM ) の開発

第一原理計算によりFe薄膜 - Fe薄膜の系でhollow site、top site、saddle

pointについて交換相互作用エネルギー、交換相互作用力、磁気モーメントに関して検討を行った。交換相互作用としてはs、p電子によるRKKY的相互作用とd電子による直接交換相互作用の2種類が探針 - 試料間の距離に対し存在し、RKKY的相互作用では磁気モーメントの変化は生じていないことが分かった。hollow siteでは交換相互作用がフェロ的であるのに対し、top siteではアンチフェロ的に働くことが分かり、原理的に原子分解能が得られる可能性があることが分かった。<sup>(3)</sup>

上記の理論的予測に基づいて実験的検証が開始された。現在考えているのはNC-AFMの利用、磁気共鳴を利用した探針、磁気抵抗効果素子の利用等である。NC-AFMを用いて、反強磁性NiO(100)劈開面の観察に成功した。<sup>(4)</sup>up spin、down spinの交互に並ぶ列よりなるのでこの違いを検出する実験を行っている。

## Ⅱ．新物質の探索

### 〔1〕 ミクロな表面磁性

磁性超薄膜の磁性とモルフォロジーの関係を知らるためにCu(001)上のfcc-Fe超薄膜の系を扱う。MgO(001)基板上にCu(001)をエピタキシャル成長させ、STMでモルフォロジーを観測し、20~200nmのアイランド構造をとっていることが分かった。この上にfcc-Feをサブ・モノレイヤー迄薄く成長させ、STMで構造およびスピン像の観察を試みている。

## Ⅲ．スピントロニクス

本研究の目的は探針先端における原子スケールのスピン偏極状態を分子軌道論の立場から論じ、そのメカニズムを明らかにしようとするものである。以下の3テーマについて研究が行われている。

- ①. GaN探針ナノ構造の自発的スピン偏極、<sup>(6)</sup>
- ②. STM探針下のシリコン表面からの水素脱離過程、<sup>(7)</sup>
- ③. Au探針 - Au試料間に生ずるAu原子架橋の異常原子間距離。<sup>(8)</sup>

### 文献

- (1) Agus Subagyo et al.:Jpn J.Appl.Phys.,38,3820(1999)
- (2) Agus Subagyo et al..Proc.10th Int.Conf. on STM/STS, 661(1999)
- (3) K.Nakamura et al.:J.Magn.Soc.Japan,23,724(1999)
- (4) H.Hosoi et al.:Appl.Surf.Sci., (2000) in printing
- (5) G.Eilers et al. :Appl.Surf.Sci., 142,527(1999)
- (6) M.Sawamura et al.: J.Mag.Soc.Japan, 23,721(1999)

M.Sawamura et al.: J.Mag.Soc.Japan, 23,1165(1999)

(7) M.Sawamura et al.:Jpn.J.Apple.Phys, 38,3853(1999)

(8) M.Sawamura et al.:Jpn. J. Appl. Phys., 投稿中

### 3 . 主な研究成果の発表 ( 論文発表 )

M.Sawamura, T.Maruyama and K.Mukasa: Theoretical Study on Spin Polarization of III-V Compound Tips, Journal of Magnetism Society of Japan, 23:721-723 ( 1999 )

Y.Kuraoka, K.Sueoka, T.Iwata, K.Mukasa, R.Aihara and K.Hayakawa: Application of a Retarding-type Mott Analyzer to Observation of Magnetic Domains, Journal of Magnetism Society of Japan, 23:727-729 ( 1999 )

E.Hirota, R.Nakane, M.Sawamura, S.Chikazumi and K.Mukasa: Structure of Spin Vortices in Ultra-Thin Ferromagnetic Films, Journal of Magnetism Society of Japan, 23:599-601 ( 1999 )

K.Nakamura, T.Oguchi, H.Hasegawa, K.Sueoka, K.Hayakawa and K.Mukasa: Theoretical study of exchange force between magnetic films, Journal of Magnetism Society of Japan, 23:724-726 ( 1999 )

M.Sawamura, T.Maruyama and K.Mukasa: Spin Electronic States of GaN Probes: Magnetism of Nanostructures, Journal of Magnetism Society of Japan, 23:1165-1168 ( 1999 )

K.Nakamura, T.Oguchi, H.Hasegawa, K.Sueoka, K.Hayakawa and K.Mukasa: Possibility of measuring exchange force through force microscopy, Applied Surface Science, 140:366-370 ( 1999 )

K.Nakamura, T.Oguchi, H.Hasegawa, K.Sueoka, K.Hayakawa and K.Mukasa: First-principles calculation of exchange force on magnetic Fe surface, Applied Surface Science, 142:433-437 ( 1999 )

M.Sawamura and K.Mukasa: Spin-Dependent Surface Characteristics for an Absorbed Hydrogen Atom under a Scanning Tunneling Microscope Environment-Atom Manipulation by Magnetic Field, Jpn.J.Appl.Phys., 38:3853-3855 ( 1999 )

A.Subagyo, K.Sueoka, K.Mukasa and K.Hayakawa: Scanning Tunneling Microscopy Study of Surface Structure and Magnetism of Fe Thin Films Grown on MgO(001), Jpn.J.Appl.Phys., 38:3820-3825 ( 1999 )

G.Eilers, Y.Yamada, M.Matsui and K.Mukasa: Scanning probe microscopy study of the interface roughness dependence of the magnetism of metallic multilayers, Applied Surface Science, 142:527-531 ( 1999 )

A.Subagyo, K.Sueoka and K.Mukasa : Growth Morphology of Epitaxial Fe Films on Annealed MgO (001) Surfaces,IEEE Transactions on Magnetics,35:3037-3039 ( 1999 )

M.Arita, R.Takei, M.Yoshida, K.Hamada, A.Okada, K.Mukasa and H.Takahashi : Ion-Shadow Sputter for the Production of STM Tips,Int.J. J. Soc. Prec. Eng.,33:215-217 ( 1999 )

M.Sawamura, T.Maruyama and K.Mukasa:Theoretical Study on Spin Polarization of III-V Compound Tips,Journal of Magnetics Society of Japan,23:721-723 ( 1999 )