

北海道大学大学院工学研究科 教授

武笠 幸一

「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

目 的

基本構想としては、電子についての従来の視点である質量・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。物質表面のスピン状態を原子分解能で測定可能な走査プローブ顕微鏡（スピンSPM）—スピン偏極STM(SP-STM)および交換相互作用力顕微鏡(EFM)の開発を行う。これはナノ構造の磁性の研究ならびに磁気記録等応用面においても強力な計測手段を提供することになる。本研究ではスピン状態の計測・理解からスピン制御を行い、表面物質層の創製を行おうとするものである。

結果概要

物質表面のスピン状態を観測する2種類の走査プローブ顕微鏡を開発した。すなわち試料表面の状態に影響を与えないGaAs劈開（薄膜）探針を用いたスピン偏極走査型トンネル顕微鏡（SP-STM）でFe（100）エピタキシャル薄膜のスピン偏極の観測（Fig. 1）および、非接触原子間力顕微鏡（NC-AFM）を用いて反強磁性NiO単結晶劈開面について原子分解能で交換相互作用の観測（EFM）に成功した（Fig.2）。またナノ構造物質における新奇なスピン現象を予測出来た。

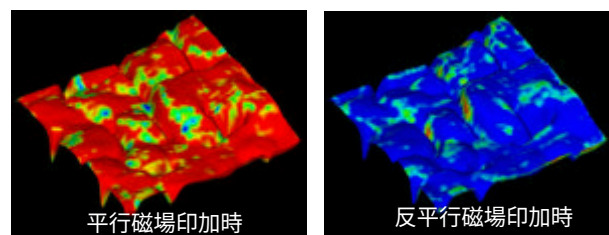


Fig. 1 Feエピタキシャル薄膜のスピン偏極像
(磁場印加によるスピン信号の変化)

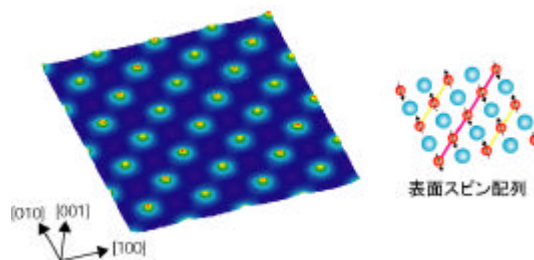


Fig. 2 反強磁性 NiO 単結晶表面のスピン像

研究成果

(1) スピン偏極STM(SP-STM)の開発

SP-STMグループでは、非強磁性体プ

ローブを用いた走査型トンネル顕微鏡により表面電子状態のスピン偏極度を測定、SP-STM画像として可視化する方法を確立することを目指し、「半導体中に光励起したスピン偏極電子をスピン偏極した磁性体表面電子状態へ注入する」実験系を構築した。

1) 表面電子状態の良く定義された磁性体薄膜試料の作製：

表面電子状態が既知の磁性体表面を必要とし、0.5eVにスピン偏極した表面準位を有する $c(2 \times 2)$ Fe薄膜を再現性良く作製できた。

2) 半導体スピンプローブの作製方法の検討：

磁気双極子相互作用による表面磁気状態への影響を避けるために、非強磁性探針を用いることとし、円偏光励起化合物半導体をスピンプローブとして採用した。先端が先鋭で構造の安定したプローブを作製することを種々試み、単結晶基板を硫化アンモニウム中で劈開して作製したプローブでスピン信号を得ることが出

来た。

3) スピン画像取得のための画像化方法の検討：

本研究では非占有準位にある状態密度の高いスピン偏極した表面準位へのスピン注入をすることを提案した。表面準位ピークでのバイアス点をフィールドバック設定点としCITSを行い、右円偏光照射時と左円偏光照射時のI-V曲線の違いを見ると、正バイアス側で大きな電流変化として検出されることを見出した。この方法は本研究で見出した新しい測定方法であり、S/Nの良いスピン偏極像が容易に得られた。

本研究の成果は、半導体中に励起したスピン偏極電子を、効率的に磁性体表面に注入するための指針を実験的に検証したものであり、磁性体表面における表面電子状態のスピン偏極度計測手法を提供するものである。また、励起したスピン偏極電子がどのようにスピン偏極トンネル効果に現れるのかを明らかにし、測定の条件・探針の作製法、表面状態の制御方法について新たな知見を得たものである。

(2) 交換相互作用力顕微鏡(Exchange Force Microscope : EFM)の開発

EFMは磁性体探針と磁性体試料間に働く交換相互作用を力として直接検出する顕微法であり、絶縁体表面や有機・生体分子の磁性を原子スケールで評価できるものと期待される。

- 1) 交換相互作用の理論的検討：実験技術開発に先立ち、探針および試料として1組のFe薄膜を用いたモデルで第一原理計算を行い、探針・試料間に働く相互作用力の理論的検討を行った。
- 2) 非接触原子間力顕微鏡(Non-contact Atomic Force Microscope: NC-AFM)技術の確立：理論的検討より得られた条件を満たす測定技術として、NC-AFMに着目した。試料としてのNiO(100)劈開表面の作製に超高真空下における清浄かつ平坦な劈開表面の作製技術の開発を行い、再現性よく表面が得られた。
- 3) 反強磁性体NiO(100)表面の原子像観察：Si探針による観察を試み、世界に先駆けて原子像観察に成功した。強磁性体探針を用いてNC-AFM観察を行った。データ解析方法—重ね焼き法—を考案し、スピン偏極度を表す原子高さの非対称性の大きさは結晶方位に依存していることが分かり、この異方性は反強磁性体のスピン配列と一致した。また、Si探針の場合には形状非対称性が観察されていないことから、この非対称性はFe探針に起因するものと考えられ、強磁性体探針を用いたNC-AFMにより交換相互作用力の検出に成功したことになる。

(3) ナノ構造におけるスピン

- 1) ナノ構造の磁性発現機構 —III-V族化合物ナノ構造における自発的スピン偏極の理論的研究：プローブ顕微鏡の探針に適したGaN探針尖端のナノ構造の磁性を現象論的、第一原理的に調べ、探針尖端のナノ構造内ではスピンの自発的に偏極していることが予測される。

- 2) 走査型プローブ顕微鏡探針による原子制御の理論 —プローブによるスピン状態制御：走査型トンネル顕微鏡探針を用いた原子制御については、実験的に広く行われているが、その理論についてはまだ未知な部分が多い。特にSi表面上の吸着H原子の脱離については脱離エネルギーの大きさから脱離は当初困難と考えられたが、本研究では、STM環境におけるH原子のポテンシャル・エネルギー面(PES)を用いて説明がなされた。
- 3) ナノワイヤの構造とスピン電子状態 —異常原子間距離の生成と崩壊：第一原理的計算によるスピン電子状態からこの現象の原理を示した。
- 4) 磁気抵抗効果による交換相互作用の検出：微細な磁気抵抗(MR)素子を搭載したマイクロカンチレバーを作製し、これを用いて高密度なプローブ—試料間距離制御が可能な走査型磁気抵抗効果顕微鏡(SMRM)を開発した。
- 5) ミクロな表面磁性：Cuの表面粗さを蒸着速度と基板温度で制御し、この上に成膜したfcc Fe薄膜の磁気モーメントと表面粗さ(基板モルフォロジー)に相関のあることを確かめた。
- 6) 強磁性/絶縁物/金属 平面型接合におけるトンネリング：スピン偏極電子の強磁性金属から半導体への注入を強磁性/AlGaAs/p-GaAs 接合におけるルミネッセンスの円偏光から確かめた。

2. 主な研究成果

(1)論文発表 (国内 24件、海外 9件)

1. K. Nakamura, H. Hasegawa, T. Oguchi, K. Sueoka, K. Hayakawa, and K. Mukasa : First-principles calculation of exchange interaction and exchange force between magnetic Fe films, Physical Review B, 56:3218 (1997)
2. 倉岡義孝, 末岡和久, 岩田達夫, 武笠幸一, 相原龍三, 早川和延 : 小型 Mott スピン分析器の SP-SEM への応用, 応用磁気学会誌, 22:389-392 (1998)
3. H. Kodama, T. Uzumaki, M. Oshiki, K. Sueoka and K. Mukasa : Spin-polarized tunneling by spin-polarized scanning tunneling microscopy, Journal of Applied Physics, 83(11, Part 2):6831-6833 (1998)
4. 末岡和久, 細山直樹, アグス・スバギョ, 武笠幸一, 早川和延 : STM による光照射 GaAs 薄膜劈開探針の研究, 表面科学, 19:522-526 (1998)
5. 武隈育子, 安井雅彦, 奥村善信, 秋田憲, 末岡和久, 長谷山美紀, 武笠幸一 : 確率信号としての磁気力顕微鏡像の解析手法, 応用磁気学会誌, 22:1251-1256 (1998)
6. 高桑真歩, 居島 薫, 中村浩次, 鳥養英子, 早川和延 : RHEED 強度定量的測定のための試料加熱法, 表面科学, 19(10):687-688 (1998)
7. K. Nakamura, T. Oguchi, H. Hasegawa, K. Sueoka, K. Hayakawa and K. Mukasa, : Theoretical study of the exchange force between magnetic Fe films; feasibility of exchange force microscopy, Jpn. J. Appl. Phys., 37:6575-6579 (1998)
8. 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)
9. 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)
10. 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)
11. 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)
12. 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)
13. 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)
14. 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)
15. 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)
16. 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)
17. 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)
18. A. Subagyo, K. Sueoka and K. Mukasa : Growth Morphology of Epitaxial Fe Films on Annealed MgO (001) Surfaces, IEEE Transactions on Magnetism, 35:3037-3039 (1999)
19. 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)
20. H. Hosoi, K. Sueoka, K. Hayakawa and K. Mukasa : Atomic resolved imaging of cleaved NiO(100) surfaces by NC-AFM, Applied Surface Science, 157:218-221 (2000)
21. T. Endou, K. Sueoka and K. Mukasa : Electron Spin-Relaxation Times in p-type δ -doped GaAs/AlGaAs Double Heterostructures, J. J. A. P., 39:397-401 (2000)
22. 中村基訓, 木村道哉, 末岡和久, 武笠幸一 : 走査型磁気抵抗効果顕微鏡用カンチレバーの設計と試作, 日本応用磁気学会, 24:771-774 (2000)
23. M. Sawamura, T. Maruyama and K. Mukasa : Spin Electronic States of Wurtzite GaN Nanostructures, 日本応用磁気学会, 24:443-446 (2000)
24. 吉本智巳, 岩田達夫, 末岡和久, 武笠幸一 : 集束イオンビームプロセスを用いて製作した Si エミッタの電界放射特性, J. Vac. Soc. Jpn., 43:817-819 (2000)
25. A. Subagyo, H. Oka, G. Eilers, K. Sueoka and K. Mukasa : Scanning Tunneling Microscopy Observation of Epitaxial bcc-Fe(001) Surface, J. J. A. P., 39:3777-3779 (2000)
26. G. Eilers and K. Mukasa : Surface Morphology of Thin Cu Films Grown on Magnesium Oxide(100), J. J. A. P., 39:3780-3783 (2000)
27. A. Subagyo, K. Sueoka and K. Mukasa : In Situ STM Observation of the Spiral Growth in the Epitaxial Fe Films on MgO(001), MRS Symposium Proceedings, 580:429-434 (2000)
28. 木村道哉, 山田良樹, 中根了昌, 中村基訓, 末岡和久, 武笠幸一 : Si_3N_4 メンブレンマスクを用いた強磁性体微細構造の作製, 日本応用磁気学会誌, 25 : 91-94 (2001)
29. 木村道哉, 中村基訓, 末岡和久, 武笠幸一 : 走査型磁気抵抗効果顕微鏡用カンチレバーの作製と評価, 日本応用磁気学会誌, 25:1079-1082 (2001)
30. H. Hosoi, M. Kimura, K. Hayakawa, K. Sueoka and K. Mukasa : Non-contact atomic force microscopy of an

- antiferromagnetic NiO(100) surface using ferromagnetic tip, Appl. Phys., A27:S23-26 (2001)
31. M.Sawamura, E.Hirota and K.Mukasa : Magnetization of Zinc Blende Compound Nanostructures, J. Magn. Soc. Japan, 25:703-706 (2001)
 32. S.Hattori, K.Sueoka, Y.Ohdaira, H.Hori and H.Ohno, K.Yoh, T.Doi, A.Subagyo, K.Sueoka and K.Mukasa : Fe(100)/InAs(100) Hybrid Structures, Journal of Applied Physics Letters, 投稿中 (2001)
 33. K.Mukasa : Photoluminescence of GaAs Tip Apex Excited by Polarized Evanescent Wave, J.J.A. P, 投稿中 (2001)

(2) 口頭発表

① 招待、口頭講演 (国内 175件、海外 15件)

1. 武笠幸一, 末岡和久, 中村浩次, 早川和延, 長谷川秀夫, 小口多美夫 : スピン SPM の開発, 日本物理学会 (表面・界面「表面磁性」シンポジウム), 名古屋 (1997)
2. 武笠幸一 : THE CURRENT RESEARCH ACTIVITY OF SPIN PROJECT IN THE NANOELECTRONICS LABORATORY, 雀部チーム CREST 国際フォーラム, 札幌市 (1997)
3. 武笠幸一 : スピン SPM の開発, 第 17 回表面科学講演大会, 東京 (1997)
4. 武笠幸一 : スピン計測からスピン・エレクトロニクスへ, 第三回北海道大学先端科学技術共同研究センター共同研究推進セミナー (分子・原子デバイスの可能性とその応用), 札幌 (1997)
5. K.Mukasa, K.Sueoka, K.Nakamura, K.Hayakawa, H.Hasegawa and T.Oguchi : Development of Spin SPM, ICSTM-5 (特別研究会「走査型トンネル顕微鏡(11)」), 金沢市 (1997)
6. K.Sueoka and K.Mukasa : Spin polarization detection with a GaAs tip, COE Seminar at NRIM, つくば (1998)
7. 武笠幸一 : スピン SPM の最近の展開, 日本応用磁気学会第 18 回光スピニクス専門研究会, 東京 (1998)
8. 武笠幸一 : スピン偏極トンネル顕微鏡超マイクロ観測手法の急激な進歩を追う——走査プローブ技術と新しい顕微鏡技術, 第 37 回茅コンファレンス「超マイクロ観測手法の急激な進歩を追う——走査プローブ技術と新しい顕微鏡技術」, 蔵王 (1999)
9. 末岡和久 : 走査型プローブ顕微鏡の基礎, 応用磁気セミナー「走査型プローブ顕微鏡による磁気測定技術」, 東京 (2000)
10. 武笠幸一 : ナノ領域のスピン計測, 北海道ナノテクフォーラム, 札幌 (2001)
11. 武笠幸一 : スピン依存 SPM の進展, 日本金属学会 2001 年春期大会, 習志野市 (2001)
12. K. Nakamura, T. Oguchi, H. Hasegawa, K. Sueoka, K. Hayakawa, and K. Mukasa : First-Principles Theoretical Study on Exchange Force between Magnetic Fe Films, 15th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS'97), Australia (1997)
13. K. Nakamura, T. Oguchi, H. Hasegawa, K. Sueoka, K. Hayakawa, and K. Mukasa : Theoretical Investigation of Exchange Force Microscopy, Hawaii (1997)
14. M.Sawamura, T.Maruyama and K.Mukasa : Ab Initio Study on Spin Polarization of III-V Compound Tips, Ninth International Conference on Solid Films and Surfaces at ユニバーシティ (1998)
15. A.Subagyo, K.Sueoka and K.Mukasa : GROWTH MORPHOLOGY OF EPITAXIAL Fe FILMS ON ANNEALED MgO (001) SURFACES, INTERMAG 99, Kyongju (Korea) (1999)
16. M.Sawamura, T.Maruyama and K.Mukasa : Magnetic GaN Nanostructures, INTERMAG 99, Kyongju (Korea) (1999)
17. K.Sueoka, A.Subagyo and K.Mukasa : SPIN-POLARIZED TUNNELING BETWEEN Fe THIN FILMS AND AN OPTICALLY PUMPED GaAs PROBE, INTERMAG 99, Kyongju (Korea) (1999)
18. M.Sawamura and K.Mukasa : High Spin and Quantum Entangled States Induced by a Au STM Probe—H Atom Desorption and Abnormally Long Atomic Distances in Au Nanowires, STM '99, Seoul (Korea) (1999)
19. K.Sueoka, A.Subagyo and K.Mukasa : Surface observation of Fe thin films with optically pumped GaAs probes, STM '99, Seoul (Korea) (1999)
20. A.Subagyo, K.Sueoka and K.Mukasa : Atomic Resolution STM of The Epitaxial bcc-Fe(001) Surface Structure, STM '99, Seoul (Korea) (1999)
21. H.Hosoi, S.Nagashima, E.Hatta, K.Sueoka and K.Mukasa : Surface observation of a Potassium Doped C60 Thin Film by Scanning Tunneling Microscope, STM '99, Seoul (Korea) (1999)
22. G.Eilers and K.Mukasa : Relation of magnetic properties and interface morphology in ultra thin Fe films, 18th General Conference of the Condensed Matter Division of the European Physical Society (CMD18-2000), Switzerland (2000)
23. A.Subagyo, H.Oka, M.Sawamura, K.Sueoka and K.Mukasa : Tunneling Spectroscopy of Magnetic Surface using Optically Pumped GaAs TIP, SPS2000, Hamburg (Germany) (2000)

② ポスター発表 (国内 10件、海外 14件)

1. G.Eilers and K.Mukasa : Scanning probe microscopy study of the interface roughness dependence of the magnetism of metallic multilayers, Ninth International Conference on Solid Films and Surfaces at ユニバーシティ (1998)
2. Y.Kuraoka, K.Sueoka, T.Iwata, K.Mukasa, R.Aihara and K.Hayakawa : Application of a Retarding-type Mott Analyzer to Observation of Magnetic Samples, Ninth International Conference on Solid Films and Surfaces at ユニバーシティ (1998)
3. K.Sueoka, S.Agus, K.Hayakawa and K.Mukasa : STM observation of magnetic thin films with an

- optically pumped GaAs thin-film tip, Ninth International Conference on Solid Films and Surfaces at ヌハ°
ンハーゲン (1998)
4. K.Nakamura, T.Oguchi¹, H.Hasegawa, K.Sueoka, K.Hayakawa and K.Mukasa : First-principles calculation of exchange force on magnetic Fe surface, Ninth International Conference on Solid Films and Surfaces at ヌハ°
ンハーゲン (1998)
 5. T.Yoshimoto, T.Iwata, K.Sueoka and K.Mukasa : Field Emission Characteristics for n-Si Tip Formed by Focused Ion Beam(FIB), 12th International Vacuum Microelectronics Conference, Darmstadt Germany (1999)
 6. T.Iwata, T.Yoshimoto, K.Sueoka and K.Mukasa : Field Emission from p-Si Emitter with Real Surface, 12th International Vacuum Microelectronics Conference, Darmstadt Germany (1999)
 7. H.Hosoi, K.Sueoka, M.Kimura, K.Hayakawa and K.Mukasa : The Atomic Resolution Imaging of Cleaved NiO(100) Surface by NC-AFM, NC-AFM'99, Switzerland (1999)
 8. H.Ohno, K.Yoh, G.Eilers, S.Agus, K.Sueoka and K.Mukasa : Electroluminescence of spin-polarized electrons injected from ferromagnetic films into InAs, SSE2000, Halle(Germany) (2000)
 9. K.Sueoka, M.Kimura, H.Ohno, G.Eilers and K.Mukasa : Spin-polarized electron injection through semiconductor tunneling barrier, SSE2000, Halle(Germany) (2000)
 10. A.Subagyo, H.Oka, M.Sawamura, K.Sueoka and K.Mukasa : STS Study on Reconstructed Surface of Epitaxial bcc-Fe Films, SPS2000, Hamburg (Germany) (2000)
 11. M.Kojima, K.Sueoka, M.Sawamura, A.Subagyo and K.Mukasa : STS Study on two dimensional Cs rows adsorbed on GaAs(011) with and without light irradiation, SPS2000, Hamburg (Germany) (2000)
 12. G.Eilers, M.Matsuura, H.Oka, A.Subagyo, K.Sueoka and K.Mukasa : Magnetic properties and nano-scale roughness: an examination of fcc-Fe films grown on Cu(001), SPS2000, Hamburg (Germany) (2000)
 13. M.Sawamura and K.Mukasa : Emergence of Ferromagnetism in a Gold Nanowire under the STM Environment, SPS2000, Hamburg (Germany) (2000)
 14. M.Sawamura and K.Mukasa : H Desorption Induced by a Pt/Au STM Probe, SPS2000, Hamburg (Germany) (2000)

(3)特許出願 (国内 20 件、海外 7 件)

① 国内

1. 武笠幸一、早川和延、末岡和久、中村浩次、田附雄一、長谷川秀夫、小口多美夫
『交換相互作用力の測定方法および交換相互作用力による磁気特性評価方法』
特願平9-85148号 平成9年4月3日
2. 武笠幸一、早川和延、末岡和久、中村浩次、田附雄一、長谷川秀夫、小口多美夫
『交換相互作用力の測定装置』
特願平9-97132号 平成9年4月15日
3. 武笠幸一、澤村 誠
『走査型トンネル顕微鏡を用いたサンプル表面の電子観測・測定方法』
特願平9-252199号 平成9年9月17日
4. 武笠幸一、澤村 誠
『走査型トンネル顕微鏡を用いたサンプル表面の電子スピン状態の制御方法及びそのビットの読み出し方』
特願平9-252200号 平成9年9月17日
5. 武笠幸一、澤村 誠
『スピン・キャパシター』
特願平9-252201号 平成9年9月17日
6. 武笠幸一、堀 裕和、北原 和夫
『光近接場励起スピン偏極走査型顕微鏡用プローブ』
特許平9-308421号 平成9年11月11日
7. 武笠幸一、水野清義、早川和延
『蛍光検出型モット検出器』
特願平10-10807号 特開平11-211838 平成10年1月22日
8. 澤村 誠、廣田榮一、中根了昌、近角聰信
『磁気記録方法及びその磁気記録装置』
特願平10-83994号 平成10年3月30日
9. 武笠幸一、水野清義、早川和延、居島薫
『同軸円筒型2次電子引き込み電極』
特願平10-104260号 特開平11-297261 平成10年4月15日
10. 武笠幸一、末岡和久
『光導波路付き探針及びその製造方法』
特願平10-178263号 特開平10-93192 平成10年6月25日
11. 武笠幸一、有田正志
『走査プローブ顕微鏡用探針の作製法およびそのための装置』
特願平10-251486号 特開2000-81381 平成10年9月4日
12. 武笠幸一、中村浩次、早川和延、末岡和久、木村道哉、細井浩貴

- 『磁気共鳴型交換相互作用力顕微鏡の測定原理』
特願平10-358937号 平成10年12月7日
13. 澤村 誠、末岡和久、廣田榮一
『走査型磁検出装置、及び走査型磁気検出用探針』
14. 渡辺秀樹、澤村 誠、末岡和久、武笠幸一、中根了昌
『周波数通倍方法及び周波数通倍機』
15. 澤村 誠、武笠幸一、末岡和久、廣田榮一、中村基訓、中根了昌
『磁気記録素子、磁気メモリ、磁気記録方法、磁気記録素子の製造方法、
及び磁気メモリの製造方法』
特許2001-150456号 2001年5月21日
16. 木村道哉、武笠幸一、末岡和久、澤村 誠、細井浩貴
『プローブ及びその製造方法ならびにプローブを有する顕微鏡及びテスト』
17. 細井浩貴、末岡和久、武笠幸一、加茂直樹、澤村 誠
『スピン測定用の分子修飾のカーボナノチューブ』
18. 陽 完治、大野 啓、武笠幸一、末岡和久
『スピンドバイス及びその製造方法』
19. 澤村 誠、武笠幸一、末岡和久
『スピンプローブによる遺伝子操作』
20. 武笠幸一、細井浩貴、下山雄平、末岡和久
『DNAスピンマップと医療への応用』

② 海外

1. 早川和延、末岡和久、中村浩次、田附雄一、長谷川秀夫、小口多美夫
『交換相互作用力の測定方法および交換相互作用力による磁気特性評価方法』
特願平9-85148号、EPC-特許願第98/302/589.1号、7Xカ第09/049,995号、
中国特許願第98/106/311.V号、大韓民国韓国特許出願第98-11628号
2. 早川和延、末岡和久、中村浩次、田附雄一、長谷川秀夫、小口多美夫
『交換相互作用力の測定装置』
特願平9-97132号、EPC-特許願第98/302/91832号、7Xカ第09/059,995号、
中国特許願第98/11/09695.5号、大韓民国韓国特許出願第98-13437/1998号
3. 澤村 誠、廣田榮一、中根了昌、近角聰信
『磁気記録方法及びその磁気記録装置』
特願平10-83994号、PCT/JP99/00546(A041-01PCT)
4. 末岡和久、武笠幸一
『光導波路付き探針及びその製造方法』
特願平10-178263号、PCT/JP99/02643(A041-02PCT)
5. 中村浩次、早川和延、末岡和久、木村道哉、細井浩貴
『磁気共鳴型交換相互作用力顕微鏡及びそれを用いた交換相互作用力の測定方法』
特願平10-358937号、PCT/JP99/07098(A041-05PCT)
6. 澤村 誠、廣田榮一、中根了昌、近角聰信
『磁気記録方法及びその磁気記録装置』
特願平10-83994号、PCT/JP99/00546 平成10年3月30日
7. 木村道哉、武笠幸一、末岡和久、澤村 誠、細井浩貴
『プローブ及びその製造方法ならびにプローブを有する顕微鏡及びテスト』

(4)受賞等

①受賞

森林 茂、末岡和久、棚橋研二、武笠幸一：FIB による GaAs-STM 探針の作製、日本表面科学会技術賞（1998）