

【技術分類】 3 - 1 - 3 評価技術 / 材料評価 / 界面評価技術

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@Z

【技術名称】 3 - 1 - 3 - 1 一方向異方性の基板クリーニング効果

### 【技術内容】

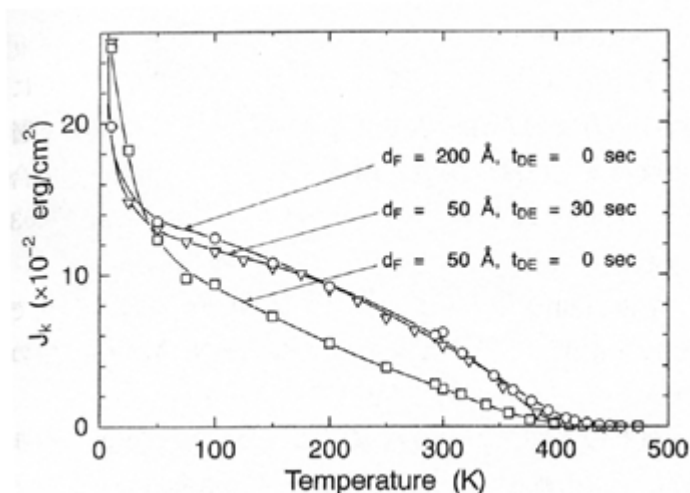
25 at% Ni-Mn膜をNi-Fe膜上に積層すると、室温で反強磁性を示す $\gamma$ -Ni-Mnが形成され、Ni-Fe膜に一方向異方性が誘導される。一方向異方性定数 $J_k$ は、Ni-Fe層の飽和磁化 $M_s$ 、磁化曲線のシフト量 $H_{ex}$ 、および膜厚 $d$ から、式 $J_k = M_s \cdot H_{ex} \cdot d$ により算出される。この $J_k$ について、積層膜を形成するときの基板表面クリーニングの効果を調べた。

基板にはSi(100)ウェーハを用い、洗浄、表面自然酸化層の除去を行った後、Arガス圧3mTorr下のRFスパッタにより、基板表面のドライエッチングを行った。放電時間 $t_{DE}$ を変化させて、エッチング量を0 - 30 の範囲で変えた。この上に、DCスパッタを用いて、Si/Ni-Fe $d_F$ /Ni-Mn1000 / Ni-Fe $1.5 \times d_F$ の三層膜を成膜した。強磁性層厚 $d_F$ は50 - 200 の範囲で変えた。

図1は、堆積直後の三層膜の $J_k$ の温度依存性を示す。 $d_F=50$  の場合は、 $t_{DE}=30$  秒のドライエッチングにより $J_k$ の向上が見られ、値も温度依存性も $d_F=200$  で $t_{DE}=0$  秒の場合とほぼ同じになる。 $J_k$ は高温では消失し、消失温度は界面全体のブロッキング温度である。 $d_F=50$  の場合、 $t_{DE}=30$  秒では、界面の局所的な交換結合のブロッキング温度が、 $t_{DE}=0$  秒のときよりも、高温側に分布していると考えられる。X線回折の結果と考え合わせて、基板表面のドライエッチングにより、下層界面の $\gamma$ -Ni-Mn結晶粒の粒径が大きくなり、熱擾乱の影響が低減されたものと見られる。

### 【図】

図1 堆積直後の三層膜の一方向異方性定数 $J_k$ の温度依存性



出典：「Ni-Fe/25 at% Ni-Mn積層膜の交換結合に及ぼす基板表面クリーニングの効果」、日本応用磁気学会誌 Vol.21 No.4-2、1997年4月1日、角田匡清、甲野藤真、采山和弘、高橋研著、社団法人日本応用磁気学会発行、515頁 Fig.3 Temperature dependence of  $J_k$  for as-deposited trilayer films.

### 【出典 / 参考資料】

「Ni-Fe/25 at% Ni-Mn 積層膜の交換結合に及ぼす基板表面クリーニングの効果」、日本応用磁気学会誌 Vol.21 No.4-2、1997年4月1日、角田匡清、甲野藤真、采山和弘、高橋研著、社団法人日本応用磁気学会発行、513 - 516 頁

【技術分類】 3 - 1 - 3 評価技術 / 材料評価 / 界面評価技術

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@Z

【技術名称】 3 - 1 - 3 - 2 スピンポンプ現象の測定

【技術内容】

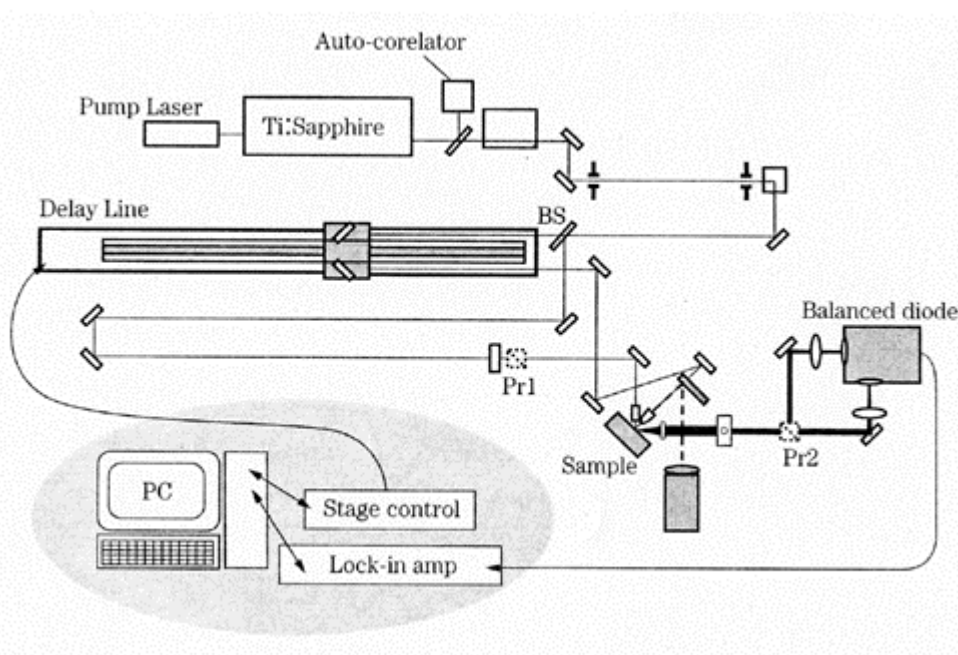
スピンは、磁場を印加すると、才差運動を行う。才差運動は時間とともに減衰し、やがてスピンの方向は磁場方向に一致する。強磁性体/非磁性体の接合において、強磁性層のスピンを才差運動させると、接合を通してスピントレントが流れる。この現象をスピンプンプという。スピンプンプ現象の大きさは才差運動の振幅に比例し、接合界面の評価に用いることができる。

スピンプンプ現象を検証するためには、パルス磁場で磁化の才差運動を直接励起して、その緩和過程を調べることが有効である。

図1は、この目的のためのポンププローブ光学系の全体図を示す。光源にはパルス幅約 100 fs の Ti:サファイアレーザを用い、このレーザ光を 10:1 に分けて、10 をポンプ光、1 をプローブ光とする。ポンプ光は遅延線を経て、光スイッチに集光する。プローブ光は、遅延線を補償する光路を経て、試料に集光し、その反射光を平衡ダイオードで測定する。光スイッチによって、試料にパルス磁場を印加すれば、スピンの才差運動が励起され、その緩和による反射光の変調が観測される。

【図】

図1 ポンププローブ光学系全体図



出典：「第5章 MRAM 5.4 MRAM 開発に付随する技術 5.4.5 スピンドイナミックス」、「スピントロニクス 次世代メモリ MRAM の基礎」、2004年4月10日、宮崎照宣著、日刊工業新聞社発行、163頁 図5.36 ポンププローブ光学系全体図

【出典 / 参考資料】

「第5章 MRAM 5.4 MRAM 開発に付随する技術 5.4.5 スピンドイナミックス」、「スピントロニクス 次世代メモリ MRAM の基礎」、2004年4月10日、宮崎照宣著、日刊工業新聞社発行、1 - 190頁

【技術分類】 3 - 1 - 3 評価技術 / 材料評価 / 界面評価技術

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@Z

【技術名称】 3 - 1 - 3 - 3 時間分解カー効果を用いた界面評価

【技術内容】

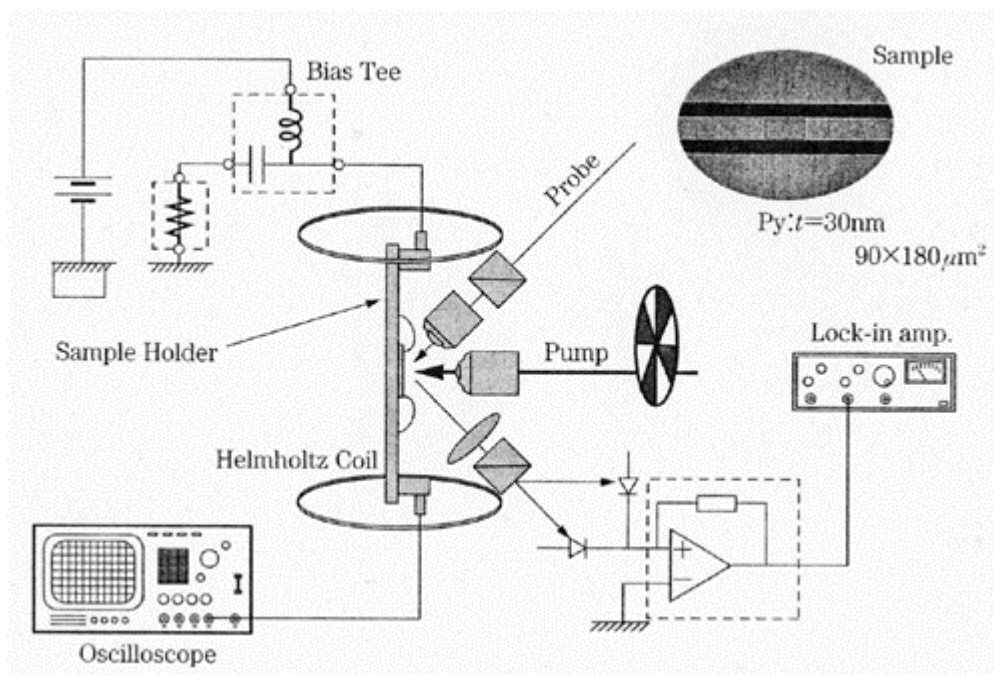
強磁性体/非磁性体の接合において、磁場を印加して強磁性層のスピンを才差運動させると、接合を  
通ってスピncurrentが流れる。この現象をスピncurrentポンプという。スピncurrentポンプ現象の大きさは才差  
運動の振幅に比例し、接合界面の評価に用いることができる。

スピncurrentポンプ現象を検証するためには、パルス磁場で磁化の才差運動を直接励起して、スピncurrentの方向が  
磁場方向に一致するまでの緩和過程を調べることが有効である。その際、時間分解カー効果の測定を用いると、より有効である。

図1は、時間分解カー効果測定の様式図を示す。レーザ光源の光をポンプ光とプローブ光に分け、  
ポンプ光を光スイッチに集光し、これによってパルス磁場を印加する。プローブ光は試料に集光し、  
その反射光のp成分とs成分の差分を平衡ダイオードで測定する。

【図】

図1 時間分解カー効果測定の様式図



出典：「第5章 MRAM 5.4 MRAM 開発に付随する技術 5.4.5 スピncurrentダイナミクス」、「スピncurrent  
トロニクス 次世代メモリ MRAM の基礎」、2004年4月10日、宮崎照宣著、日刊工業新聞社発行、163  
頁 図5.37 時間分解 Kerr 効果測定の様式図

【出典 / 参考資料】

「第5章 MRAM 5.4 MRAM 開発に付随する技術 5.4.5 スピncurrentダイナミクス」、「スピncurrent  
トロニクス 次世代メモリ MRAM の基礎」、2004年4月10日、宮崎照宣著、日刊工業新聞社発行、1 - 190  
頁

【技術分類】 3 - 1 - 3 評価技術 / 材料評価 / 界面評価技術

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@Z; G01B21/30

【技術名称】 3 - 1 - 3 - 4 伝導性原子力間顕微鏡

【技術内容】

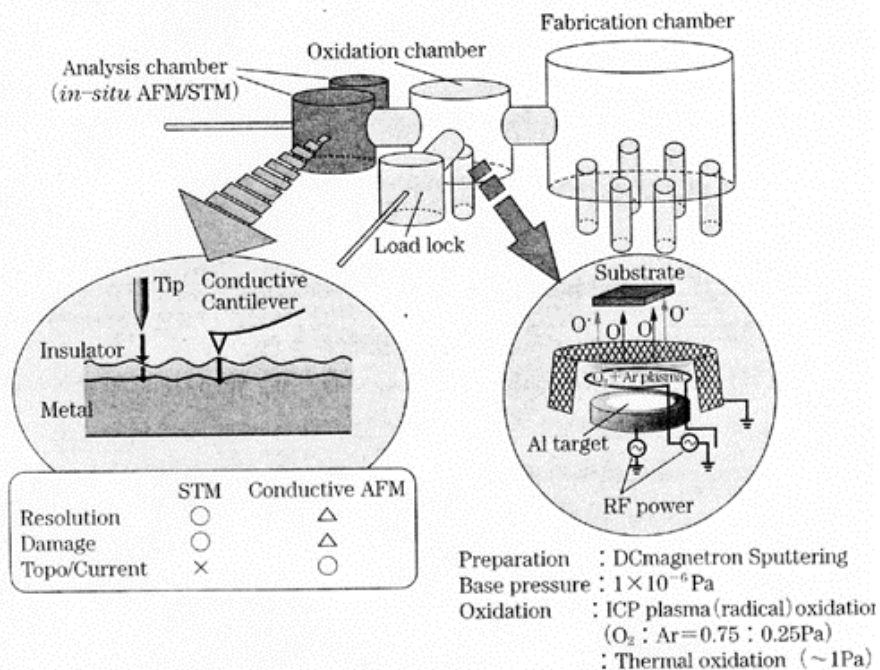
強磁性体接合では、電流電圧 (I-V) 特性を解析することにより、接合の障壁の高さ ( ) と幅 (d) を求めることができる。しかし、この方法で得られるのは接合の平均値である。それに対し、伝導性原子力間顕微鏡 (AFM) を用い、試料と探針間に電圧を印加すると、局所的な電流電圧特性を測定することができる。これにより、局所的な および幅 d を求めることができ、また、表面の凹凸像や電流像が得られ、それらから絶縁層の評価を行うことができる。

図 1 は、伝導性 AFM 実験装置の概略を示す。試料は、強磁性体などの金属層の上に、トンネル障壁膜となる絶縁層を堆積したものである。探針用のカンチレバーチップは  $\text{Si}_3\text{N}_4$  で作られており、表面を約 400 厚の Au 膜で被覆してある。これで試料の絶縁膜表面をなぞることで、表面の凹凸像を得ることができる。また、チップと基板間に電圧を印加することにより、電流像および原子レベルの局所的な I-V 特性を測定することができる。例えば、d は一定であるが、 は電流像の明るい部分が暗い部分よりも約 1 eV 低いといった情報が得られている。

伝導性 AFM は、試料表面にある程度の厚さの絶縁層があれば、非常に有効な手段である。

【図】

図 1 伝導性 AFM 実験装置の模式図



出典：「第 5 章 MRAM 5.4MRAM 開発に付随する技術 5.4.3 伝導性原子力間顕微鏡 (Conducting AFM) および STM」, 「スピントロニクス 次世代メモリ MRAM の基礎」, 2004 年 4 月 10、宮崎照宣著、日刊工業新聞社、146 頁 図 5.23 コンダクティブ AFM 実験装置の模式図

【出典 / 参考資料】

「第 5 章 MRAM 5.4MRAM 開発に付随する技術 5.4.3 伝導性原子力間顕微鏡 (Conducting AFM) および STM」, 「スピントロニクス 次世代メモリ MRAM の基礎」, 2004 年 4 月 10、宮崎照宣著、日刊工業新聞社、1-190 頁

【技術分類】 3 - 1 - 3 評価技術 / 材料評価 / 界面評価技術

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@Z; G01J3/433

【技術名称】 3 - 1 - 3 - 5 非弾性電子トンネル分光法 ( IETS )

【技術内容】

非弾性電子トンネル分光法 ( IETS ) は、強磁性体 / 絶縁体の界面状態を、伝導特性より直接調べることができる方法である。

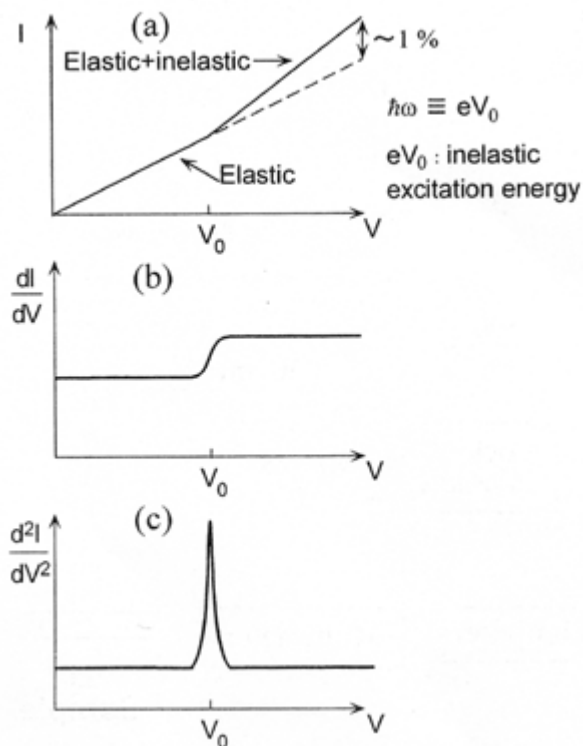
図 1 は、トンネル接合における伝導特性を模式的に示す。絶縁体もしくは金属 / 絶縁体界面では、電子が、エネルギー  $\hbar\omega = eV_0$  を失って、非弾性的にトンネルすることがある。このとき、電流 ( I ) 電圧 ( V ) 特性は ( a ) に示すように  $V_0$  を境に電流が変化する。しかし変化は 1% 以下と非常に小さい。そこで、 ( b ) または ( c ) のように、コンダクタンス  $dI/dV$  または  $d^2I/dV^2$  をとって、ステップ変化またはピークとして観測する。とくに、  $d^2I/dV^2 - V$  のピークは、非弾性励起モードの分布と対応し、非弾性電子トンネル ( IET ) スペクトルといい、その測定法を非弾性電子トンネル分光法 ( IETS ) という。

図 2 は、  $dI/dV - V$  および IET スペクトルの測定回路を示す。直流バイアス電圧に弱い交流変調電圧を重畳し、 1f および 2f 周波数成分をロックインアンプで測定する。これらより  $dI/dV - V$  および IET スペクトルが得られる。

この方法により、例えば、接合界面における磁性不純物が伝導特性に及ぼす影響を調べることができる。とくに、 IETS は接合界面の状態の変化を敏感に捉え、 TMR 比の印加電圧依存性や温度変化の解明に役立つ。

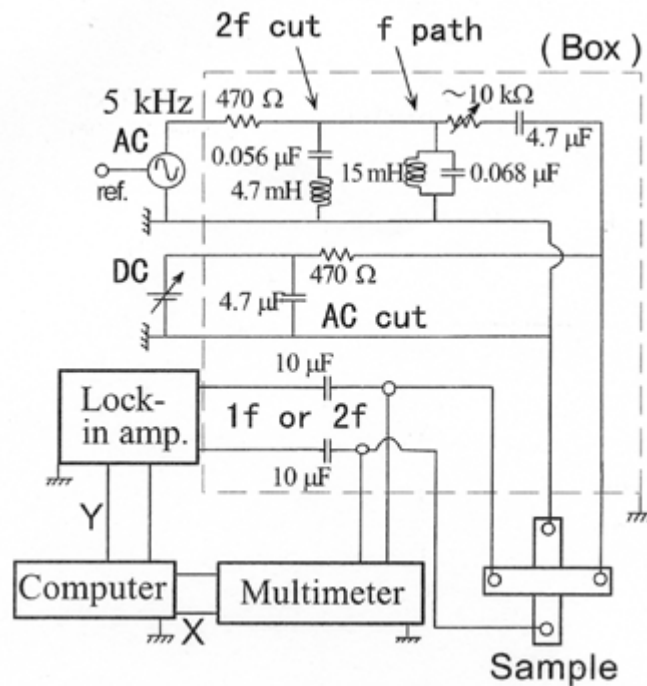
【図】

図 1 トンネル接合の伝導特性 : ( a ) I - V 曲線、 ( b )  $dI/dV - V$  曲線、 ( c ) IET スペクトル



出典 : 「非弾性電子トンネル分光法 ( IETS ) を用いた強磁性体 / 絶縁界面の解析」, 「日本応用磁気学会誌 Vol.22 No.4-2」, 1998 年 4 月 15 日、村井純一郎、安藤康夫、手束展規、宮崎照宣著、社団法人日本応用磁気学会発行、573 頁 Fig1 Schematic illustration of ( a ) an I - V curve, ( b ) a  $dI/dV - V$  curve, and ( c ) an IET spectrum.

図2  $dI/dV$ - $V$  および IETS の測定回路



出典：「非弾性電子トンネル分光法(IETS)を用いた強磁性体/絶縁界面の解析」、「日本応用磁気学会誌 Vol.22 No.4-2」, 1998年4月15日、村井純一郎、安藤康夫、手束展規、宮崎照宣著、社団法人日本応用磁気学会発行、574頁 Fig2 Electric circuit used for the  $dI/dV$ - $V$  and IETS measurements.

【出典 / 参考資料】

「非弾性電子トンネル分光法(IETS)を用いた強磁性体/絶縁界面の解析」、「日本応用磁気学会誌 Vol.22 No.4-2」, 1998年4月15日、村井純一郎、安藤康夫、手束展規、宮崎照宣著、社団法人日本応用磁気学会発行、573 - 576頁

【技術分類】 3 - 1 - 3 評価技術 / 材料評価 / 界面評価技術

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@Z; G01J3/433

【技術名称】 3 - 1 - 3 - 6 非弾性電子トンネル分光法 ( IETS ) の原理

【技術内容】

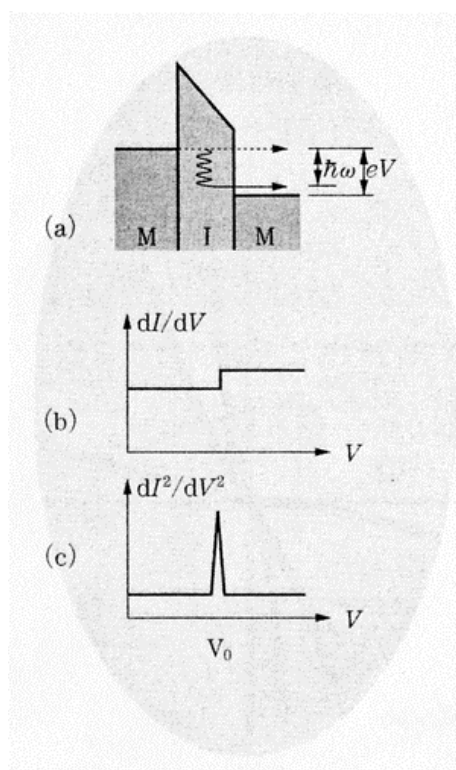
非弾性電子トンネル分光法 ( IETS ) は、トンネル電流 - 電圧特性から、試料の界面状態を調べる方法である。電極をプローブとし、外部電場を印加して、電子の非弾性トンネル過程に寄与するさまざまな励起を観測することができる。特徴は高感度なことである。

図 1 は、IETSの原理を示す。試料として、金属/絶縁体/金属接合を考える。これに外部から電圧を印加し、次第に大きくしていく。非弾性トンネル過程があると、図 1(a)のように、電子は弾性的なトンネルに加えて、非弾性エネルギー $\hbar\omega$ だけ下がった準位にトンネルする。これを $dI/dV$ 曲線で見ると、図 1(b)のようになる。この $dI/dV$ のステップ量は1%以下と非常に小さいが、二次微分 $d^2I/dV^2$ で見ると、図 1(c)に示すように、明瞭なピークとして観測することができる。

ピーク位置 ( $V_0$ ) に相当するエネルギーの値から、非弾性過程を調べることができる。とくに電圧の印加方向で、このスペクトルが非対称になることがある。その非対称性から、絶縁層の両側のそれぞれの界面状態の情報を得ることができる。

【図】

図 1 IETS の原理図



出典：「第 5 章 MRAM 5.4MRAM 開発に付随する技術 5.4.2 非弾性電子トンネル分光 ( IETS )」、 「スピントロニクス 次世代メモリ MRAM の基礎」、2004 年 4 月 10 日、宮崎照宣著、日刊工業新聞社、142 頁 図 5.18 IETS の原理図

【出典 / 参考資料】

「第 5 章 MRAM 5.4MRAM 開発に付随する技術 5.4.2 非弾性電子トンネル分光 ( IETS )」、 「スピントロニクス 次世代メモリ MRAM の基礎」、2004 年 4 月 10 日、宮崎照宣著、日刊工業新聞社、1-190 頁

【技術分類】 3 - 1 - 3 評価技術 / 材料評価 / 界面評価技術

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@Z; G01J3/433

【技術名称】 3 - 1 - 3 - 7 非弾性電子トンネル分光法 ( IETS ) の測定回路

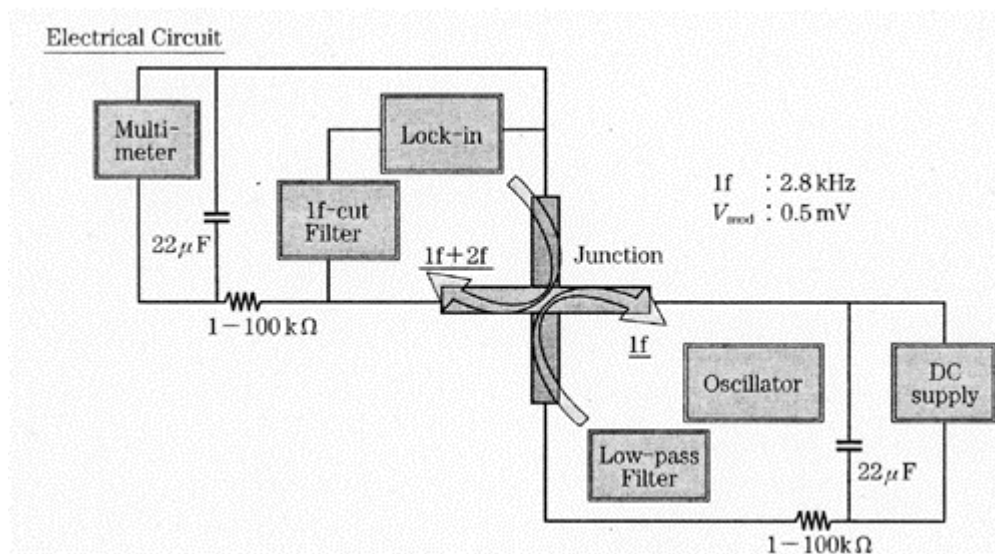
【技術内容】

非弾性電子トンネル分光法 ( IETS ) は、トンネル電流 (  $I$  ) - 電圧 (  $V$  ) 特性から、試料の界面状態を調べる方法である。電極をプローブとし、外部電場を印加して、電子の非弾性トンネル過程に寄与するさまざまな励起を観測することができる。特徴は高感度なことである。

図 1 は、IETSの測定回路を示す。熱エネルギーの影響を最小にするため、測定は 4.2 Kで行う。図の Junction の部分がクライオスタットの中におさまる。右下の回路が外部電圧印加用の回路で、電圧を  $1f = 2.8 \text{ kHz}$ 、 $V_{mod} = 0.5 \text{ mV}$  で振幅変調して印加する。左上は測定回路で、 $1f$ 成分と  $2f$ 成分の組み合わせを検出することにより、 $d^2I/dV^2$ を求める。

【図】

図 1 IETS 測定回路図



出典：「第 5 章 MRAM 5.4MRAM 開発に付随する技術 5.4.2 非弾性電子トンネル分光 ( IETS )」、 「スピントロニクス 次世代メモリ MRAM の基礎」、2004 年 4 月 10 日、宮崎照宣著、日刊工業新聞社発行、144 頁 図 5.20 IETS 測定回路図

【出典 / 参考資料】

「第 5 章 MRAM 5.4MRAM 開発に付随する技術 5.4.2 非弾性電子トンネル分光 ( IETS )」、 「スピントロニクス 次世代メモリ MRAM の基礎」、2004 年 4 月 10 日、宮崎照宣著、日刊工業新聞社発行、1-190 頁

【技術分類】 3 - 1 - 3 評価技術 / 材料評価 / 界面評価技術

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110

【技術名称】 3 - 1 - 3 - 8 放射光円二色性光電子顕微鏡による磁区評価

【技術内容】

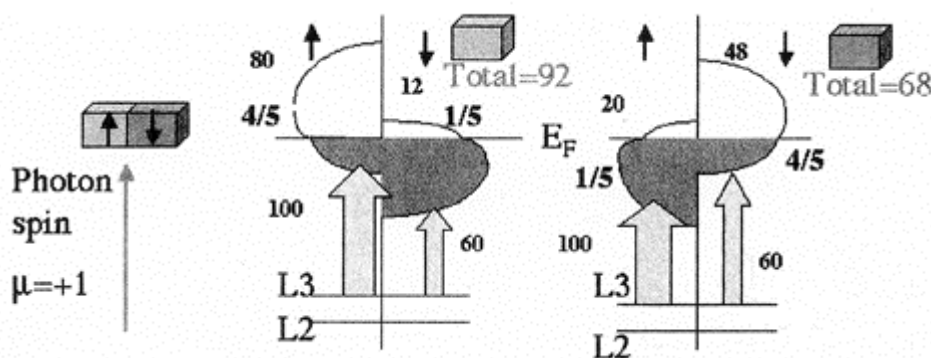
シンクロトロン放射光には波長可変性、高輝度性、偏光性などの特徴がある。とくに円偏光を用いた円二色性光電子顕微鏡 (MCD-PEEM) は、磁性体ナノ構造中の磁区構造を解明するのに適する。

図 1 は、MCD-PEEMの原理を示す。いま、ある方向に磁化された遷移金属 (TM) 化合物に平行に円偏光放射光を照射し、TM  $2p_{3/2}$  軌道 ( $L_3$ ) からTM 3dバンドの空いた準位に電子が励起する場合を考える。磁化された試料のTM 3dバンドでは、上向きスピンと下向きスピンのバンドで空いている準位の数異なる、円偏光放射光の吸収確率が異なる。磁化の向きを反平行にした場合、あるいは逆周りの円偏光を照射した場合には、吸収確率が逆転する。そのため、光と平行方向に磁化した領域からの2次電子放出が多くなり、磁気コントラストが得られる。

図 2 は、反時計回りの磁化を示すパーマロイ・リング・パターンのMCD-PEEM像を示す。Fe  $2p_{1/2}$  3dバンドの遷移エネルギーに相当する円偏光放射光を、試料すれすれに照射して、放出された全光電子収量を測定し、イメージングを行っている。光の方向と平行に磁化した領域が明るく写っており、リングは反時計方向に回転する磁気モーメントを持っていることが分かる。

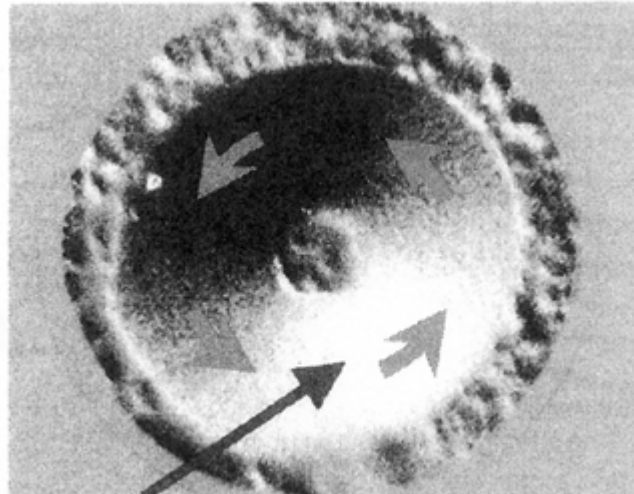
【図】

図 1 円二色性光電子顕微鏡 (MCD-PEEM) の原理



出典:「磁性ナノ構造の作製と放射光を用いた評価(磁気素子作製のための微細構造制御技術の最新動向)」、 「日本応用磁気学会研究会資料 Vol.132」、 2003年11月28日、尾嶋正治、組頭広志、岡林潤、小野寛太著、社団法人日本応用磁気学会発行、16頁 Fig.8 Principle of MCD generating magnetic contrast.

図 2 反時計回りの磁化を示すパーマロイ・リング・パターンのMCD-PEEM像



**Circularly-polarized SR beam**

出典：「磁性ナノ構造の作製と放射光を用いた評価（磁気素子作製のための微細構造制御技術の最新動向）」、「日本応用磁気学会研究会資料 Vol.132」、2003年11月28日、尾嶋正治、組頭広志、岡林潤、小野寛太著、社団法人日本応用磁気学会発行、16頁 Fig.10 MCD-PEEM image of permalloy ring pattern showing counter-clockwise magnetization.

**【出典 / 参考資料】**

「磁性ナノ構造の作製と放射光を用いた評価（磁気素子作製のための微細構造制御技術の最新動向）」、「日本応用磁気学会研究会資料 Vol.132」、2003年11月28日、尾嶋正治、組頭広志、岡林潤、小野寛太著、社団法人日本応用磁気学会発行、9 - 16頁

【技術分類】 3 - 1 - 3 評価技術 / 材料評価 / 界面評価技術

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110

【技術名称】 3 - 1 - 3 - 9 トンネル磁気接合界面の評価方法

【技術内容】

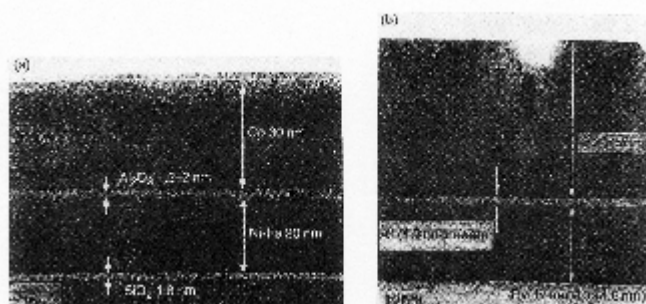
接合の評価方法とは、厚さ 10 - 20 の絶縁層 (Al 酸化物) の障壁の高さおよび幅の状態や、絶縁層と磁性層の界面の原子配列の状態を実験的に知るための方法である。

接合断面を透過電子顕微鏡 (TEM) 観察すれば、界面の状態をある程度調べられる。図 1 は、TEM 像の例を示す。Al 酸化物を大気中で自然酸化した場合 (a) に比べて、ICP プラズマ酸化した場合 (b) は、絶縁層が均一であり、少なくとも厚さのばらつきが少ないように見える。しかし、TEM といってもなおマクロ観察である。原子レベルでは、図 2 (a) の理想状態からは程遠く、図 2 (b) のようになっている恐れがある。界面のラフネス、相互拡散、絶縁層と磁性層との格子定数の不整合による格子歪み、界面での Al 酸化物以外の酸化物の生成があり得る。

コンタクト原子間力顕微鏡 (AFM) を用いると、絶縁層表面の凹凸の測定ができる。同時に、試料と短針の間に電圧を印加して電流を測定することにより、独立に局所的な障壁高さを測定することができる。図 3 に  $Ni_{80}Fe_{20}/Co/Al$  酸化物表面  $150 \times 150$  nm の観察例を示す。表面の平均の粗さは約 0.2 nm、凹凸のうねりの周期は 20 nm 前後である。それに対して、電流像には 2 nm 前後の微細な構造が見られ、凹凸像とは必ずしも一致しない。局所電流電圧曲線の解析から、障壁の幅はほぼ均一で、電流像の濃淡は障壁の高さの分布を反映していることが分かる。

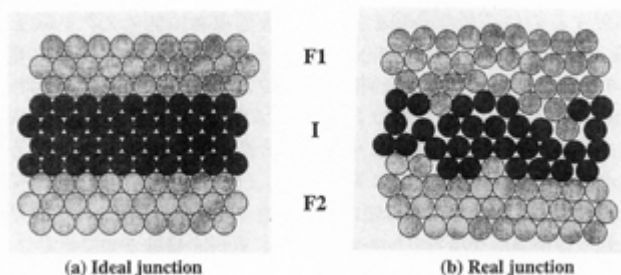
【図】

図 1 トンネル接合断面の TME 像 : (a) 自然酸化、(b) ICP プラズマ酸化



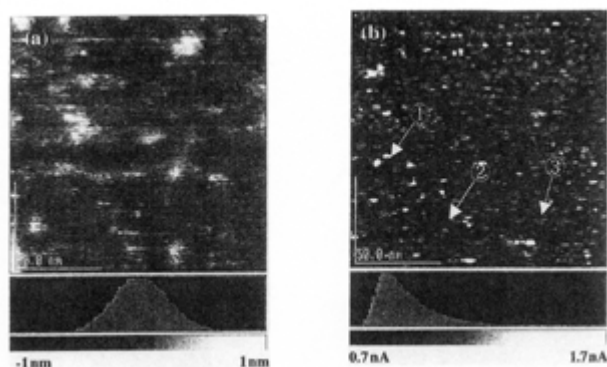
出典 : 「トンネル磁気低抗効果に関する最近の研究」, 「日本応用磁気学会研究会資料 Vol.112」, 1999年11月26日、宮崎照宣著、社団法人日本応用磁気学会発行、4頁 Fig.2 TME image for the cross section of the tunnel junction prepared by natural oxidation (a) and ICP plasma oxidation (b).

図 2 トンネル接合の断面模型 : (a) 理想状態、(b) 実際の状態



出典 : 「トンネル磁気低抗効果に関する最近の研究」, 「日本応用磁気学会研究会資料 Vol.112」, 1999年11月26日、宮崎照宣著、社団法人日本応用磁気学会発行、4頁 Fig.3 Schematic cross section of the tunnel junction. (a):ideal case and (b):real case.

図3 AFMによるNi<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>/Co/Al酸化物表面の凹凸像(a)と同時測定電流像(b)



出典:「トンネル磁気低抗効果に関する最近の研究」、日本応用磁気学会研究会資料 Vol.112、1999年11月26日、宮崎照宣著、社団法人日本応用磁気学会発行、4頁 Fig.4 The topographical image (a) and electrical image (b) for Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>/Co/Al-oxide junction.

【出典 / 参考資料】

「トンネル磁気低抗効果に関する最近の研究」、日本応用磁気学会研究会資料 Vol.112、1999年11月26日、宮崎照宣著、社団法人日本応用磁気学会発行、1 - 9頁

【技術分類】 3 - 1 - 3 評価技術 / 材料評価 / 界面評価技術

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110

【技術名称】 3 - 1 - 3 - 1 0 コンタクト AFM による MTJ の局所電流分布の熱処理効果

【技術内容】

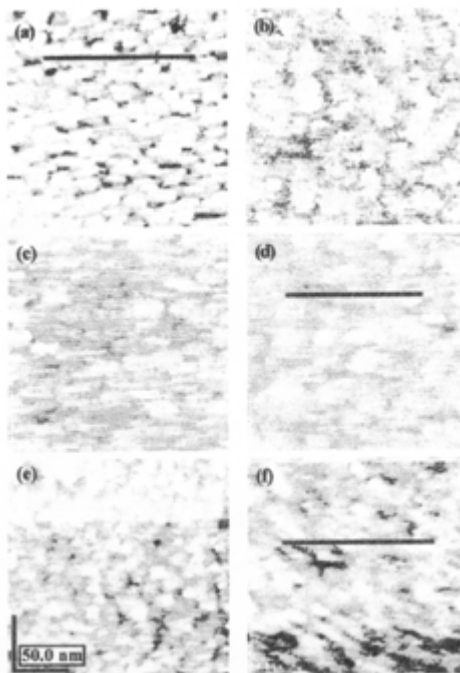
微小領域の伝導特性の観察には、コンタクト方式の原子間力顕微鏡 (AFM) が優れている。この方法を用いて、強磁性トンネル接合 (MTJ) の表面の電流像を観測することにより、局所的な電流特性を調べることができる。その熱処理温度依存性から、MTJ のトンネル障壁絶縁層の生成状態について、熱処理による変化を知ることができる。

図 1 は、AFM による MTJ 表面の電流像を示す。接合構成は Ta/ NiFe/ Cu/ NiFe/ IrMn/ CoFe/ Al-O である。試料の熱処理は、AFM チェンバ内で 1 時間程度行い、数時間の冷却後測定した。電流像は、原子間力一定のコンタクトモードで試料表面を走査し、同時に試料に電圧を印加して、試料と探針間に流れる電流をマッピングして得られる。電流のコントラストは、作製直後は大きいものに対して、熱処理温度の上昇に伴い、小さくなっていき、300 で最小になった後、再び大きくなる。なお、同時に測定した表面形状像は、熱処理しても顕著な変化を示していない。

図 2 は、局所電流分布で示す。ドットは図 1 から得た局所電流値の頻出度を示す。何点かの局所電流と印加電圧の関係から、電流の分布は、おもに絶縁層の障壁の高さに依存することが分かる。そこで、障壁高さのガウス分布を仮定して、理論式をこれらの電流分布に合わせた。図 2 の実線は、その結果を示す。得られた障壁高さの平均値  $\mu_{av}$  と標準偏差  $\sigma$  を図中に示す。300 で、 $\mu_{av}$  は 3.2 eV 程度に増加し、 $\sigma$  は 0.1 eV 程度に減少している。

【図】

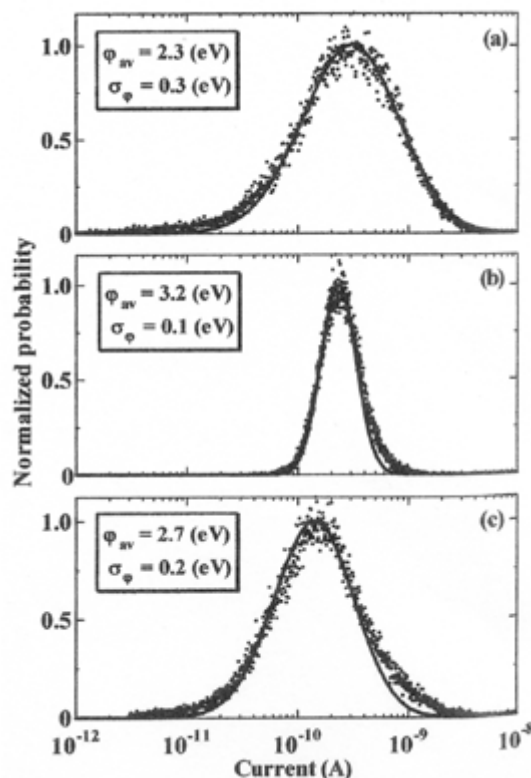
図 1 Ta/ NiFe/ Cu/ NiFe/ IrMn/ CoFe/ Al-O 接合表面の電流像 (200 × 200 nm<sup>2</sup>)。 (a) 熱処理前、他は熱処理後で、熱処理温度は (b) 200 、 (c) 250 、 (d) 300 、 (e) 350 、 (f) 400



出典：「強磁性トンネル接合のスピン依存局所伝導特性」, 「日本応用磁気学会誌 Vol.25 No.4-2 論文特集号」, 2001 年 4 月 15 日、林将光、安藤康夫、久保田均、宮崎照宣著、社団法人日本応用磁気学会発行、760 頁 Fig.1 Electrical current image (200 × 200 nm<sup>2</sup>) of the surface of a Ta/ NiFe/ Cu/ NiFe/ IrMn/ CoFe/ Al-oxide junction (a) as prepared and after annealing at (b) 200 , (c)

250 , (d) 300 , (e) 350 , and (f) 400 .

図2 電流イメージから統計的に算出した MTJ の電流分布。ドットは図1 から求めた頻出度、実線は障壁高さのガウス分布を仮定して合わせた結果を示す。(a)熱処理前、(b)300 熱処理後、(c)400 熱処理後



出典：「強磁性トンネル接合のスピンの依存局所伝導特性」、「日本応用磁気学会誌 Vol.25 No.4-2 論文特集号」、2001年4月15日、林将光、安藤康夫、久保田均、宮崎照宣著、社団法人日本応用磁気学会発行、760頁 Fig.2 Current histogram statistically calculated from the electrical current image indicated by dots. Solid lines are fitting results considering the Gaussian distribution of barrier height for the junction (a) as-prepared, (b) after annealing at 300 , and (c) 400 .

【出典 / 参考資料】

「強磁性トンネル接合のスピンの依存局所伝導特性」、「日本応用磁気学会誌 Vol.25 No.4-2 論文特集号」、2001年4月15日、林将光、安藤康夫、久保田均、宮崎照宣著、社団法人日本応用磁気学会発行、759 - 762 頁