マイクロマシニングによる超小型電磁モータの開発* (第2報, 絶縁層のエッチング条件の検討)

太田 斎^{*1}, 小田 拓嗣^{*1}, 武田 宗久^{*2}

The Development of Ultra Small Electromagnetic Motor by Micromachining (2nd Report, Etching Conditions of Insulation Layer)

Hitoshi OTA^{*3}, Takuji ODA and Munehisa TAKEDA

^{*3} Mitsubishi Electric Cop., Advanced Technology R & D Center,
8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki-shi, Hyogo, 661-8661 Japan

Etching conditions of SiO₂ were investigated in order to fabricate the insulation layer of coils used for electromagnetic micro motors. The effects of cooling temperature of substrate, pressure, RF power, and the amount of reactive gases on the shape of insulation layer were examined using ECR-RIE method. CF₄ and CHF₃ gases were selected as reactive gases, and 18 μm thick insulation layer was processed. In coil fabrication process, Cu is electroplated after the etching of the insulation layer. The additional etching conditions of the insulation layer were investigated to get the uniform electroplated Cu film. From these experiments, the following conclusions were obtained. (1) The amount of side etching of the insulation layer was minimized under the conditions of RF power of 125 W and the flow rate of CF₄ and CHF₃ gases of 30 SCCM. (2) The selectivity of SiO₂ and Cu metal mask reached 20.6, and the aspect ratio of 9 (18 μm in height and 2 μm in width) was obtained. (3) During the etching process, ion bombarded the electrode film that was used for electroplating. The material etched by bombarded ion adhered on the surface of the insulation layer, and as a result, Cu was not electroplated uniformly in the cavity of the insulation layer. It was clarified that the electroplated Cu film grew uniformly after the cleaning process by O₂ gas.

Key Words: Micromachine, Micro Motor, Micro Coils, Reactive Ion Etching, High Aspect Ratio Etching, Method, Electromagnetic Motor, Non-Traditional Machining, Coating, Surface Treatment

1. 結 言

近年, 機器の超小型化のための研究が盛んに行われており, 数十ミクロンから数ミリの大きさの静電モータ⁽¹⁾⁽²⁾や電磁モータ⁽³⁾⁽⁴⁾の開発が行われている。静電モータに関しては種々の方式が提案されており, 小型化が期待されるが, 出力が小さい欠点がある。機械システムが極端に小さくなった場合には静電力を利用した機械システムが有効と考えられるが⁽⁵⁾, ある程度実用的な出力を取り出すためには, 電磁力を利用したミリサイズのモータを組み合わせてシステムを構成することも必要と考えられる。

モータの超小型化および高出力化を実現するた

めには, 導体の占積率を大きくする必要がある。従来, 多層のコイルを製造した例⁽⁶⁾⁽⁷⁾はあるが, 絶縁層のアスペクト比は通常 1~3 程度であり, コイルは扁平な形状である場合が多い。

先に筆者らは, 絶縁層として SiO₂ を成膜するための実験を行って, 半導体と比較して 1 桁以上厚い膜を低残留応力で形成する手法について検討した⁽⁸⁾。本報告では, 反応性イオンエッチング法⁽⁹⁾ (Reactive Ion Etching, 以下, RIE法と呼ぶ) により, 高アスペクト比 (加工深さを幅で除した値) で μm オーダの線幅のコイルの絶縁層を形成するためのエッチング条件などについて検討する。

エッチングを行うときには, レジストをマスクとして用いる場合が多い。しかし, レジストで μm オーダの線幅のパターンを形成する場合には, 厚さも線幅と同程度となるために, 加工対象とする材料が厚いときには, エッチング中にレジストが先に除

* 原稿受付 2001 年 5 月 1 日。

^{*1} 正員, 三菱電機(株)生産技術センター(〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1) (元: 三菱電機(株)先端技術総合研究所)。

^{*2} 三菱電機(株)先端技術総合研究所。

E-mail: Ota.Hitoshi@mdl.melco.co.jp

去されてしまい、所定の寸法、形状に加工することが不可能となる。そこで、マスクとしてCuで構成した金属のマスク（以下、メタルマスクと呼ぶ）を用いてエッチングを行って、絶縁層の高アスペクト比化について検討する。

基板の冷却温度、加工中の圧力、基板に印加する高周波の電力（以下、RFパワーと呼ぶ）などをパラメータにして加工実験を行い、これらのパラメータが加工形状やエッチングレート（単位時間当たりの加工深さ）に及ぼす影響を調べる。そして、絶縁層の加工後、導体の電気めっきを行うために必要な処理法について検討して得られた知見を示す。

2. エッチング法と予備検討

2.1 エッチング装置 絶縁層のエッチングには図1に示す装置（Plasma-Therm Inc.製、SLR-770）を用いた。図1に示した装置はECR（Electron Cyclotron Resonance：電子サイクロトロン共鳴）方式のイオン源が取り付けられたエッチングチャンバ、基板の冷却用の熱交換器、真空排気系、イオンを引き出すための上下コイル、このコイルを冷却するための水冷系から構成される。図1に示した方式では、プラズマを発生させるイオン源の軸方向に磁界を作用させ、導波管を通してマグネトロンで2.54GHzの周波数のマイクロ波電力をイオン源に供給する。プラズマ中の電子は、上下のコイルに通電して発生させた磁界の周りに磁界と直交する面内で回転する。移動度の大きい電子は、磁力線に拘束されて磁束の方向に進み、このとき生じる電位差でイオンが加速され、イオンと電子は基板の方向に引き出される⁹⁾。

Fig.1 Schematic of ECR-RIE

また、基板には、RFパワーを作用させてプラズマの発生密度を大きくできる構成となっている。基板を保持するホルダには、冷却された冷媒が循環されており、Heガスをホルダに導入することによって、基板を直接冷却するようにした。Heガスを基板の冷却媒体に用いるのは、熱伝導率が大きく熱を拡散し易いことに起因する。また、エッチングチャンバの排気はターボポンプとロータリポンプで行い、 1×10^{-4} Pa以下の圧力を得ることが可能である。

エッチングのパラメータは多岐にわたるが、まず、予備的な検討を行うことを目的に、加工形状に影響を及ぼすパラメータとして、基板の冷却温度と加工中の圧力を取上げ、エッチングの進行の様子を調べた。表1にエッチング条件を示す。基板には直径が3インチのシリコン基板を用い、この上にプラズマCVD法で約 $5 \mu\text{m}$ の厚さに SiO_2 を成膜した。

エッチングに用いる反応性のガスとしてフッ素系の CF_4 を選定した。 CF_4 はプラズマ中で解離すると、反応性に富むF原子やFラジカル、 CF_x ラジカル、 CF_x^+ イオン($x=1\sim3$)が発生する¹⁰⁾。プラズマ中から発生する中性ラジカルは SiO_2 の表面に吸着し、化学反応により表面状態が変化する。このとき電極降下電圧により加速されたイオンの衝撃が加わることにより、 SiO_2 中のSiは揮発性生成物の SiF_4 や Si_2F_6 として、また、 SiO_2 中のO（酸素）は CO 、 CO_2 として除去され、その結果 SiO_2 のエッチングが進行する。

2.2 基板の冷却温度と圧力が加工形状に及ぼす影響 RIE法による加工形状は基板の冷却温度に依存することが知られている¹¹⁾¹²⁾。すなわち、基板の冷却温度が低い場合は断面がテーパ状（溝底部の幅は狭い）になるのに対し、高い場合は逆テーパ状（溝底部の幅は広い）になる。これは、エッチング時の反応生成物が低温になるほど側壁（基板に対して垂直な方向の加工面）に付着・堆積しやすくなり、これが電氣的に中性なFラジカルの等方的なエッチング作用に対し保護膜として作用するためと推察される。

Table 1 Etching conditions

RF power	50 W
Flow rate of CF_4	30 SCCM
Etching time	20 min.
Cooling temperature	-20.0°C
Pressure	0.2, 0.7, 1.3 Pa

図2に、加工形状に及ぼす基板の冷却温度の影響を調べた実験結果の一例として、エッチング後の SiO_2 の側壁をSEMで観察した結果を示す。図2は、圧力を0.2 Paにして加工したときの結果である。図2から、基板の冷却温度が高い場合、側壁に段差が生じていることがわかる。これは不十分な試料冷却に起因するものと考えられる。すなわち、段差から上の部分はエッチング時に温度が上昇し、側壁の保護膜の形成が阻害されたものと推察される。また、底面には柱状の残渣が観察されていることがわかる。これに対し、図2(b)に示すように、基板を -20°C に冷却した場合には、柱状の残渣や段差は観察されていないことがわかる。

以上の結果から、基板の冷却温度として -20°C を選定すれば、柱状の残渣などの発生を抑制できることがわかる。

つぎに、エッチング時の圧力⁽¹³⁾について検討した。圧力を小さくすることによって、分子平均自由行程が長くなり、基板に対して垂直にイオンが入射する確率が高くなることから、異方性の高い加工形状が得られることが予想された。そこで、圧力がエッチングの進行に及ぼす影響について調べた。

図3に、エッチング後の断面の写真を示す。図

3には、基板冷却温度を -20°C にしてエッチングした後の顕微鏡写真を示す。図3に示すように、圧力が高い場合、エッチングした領域には柱状の残渣が認められる。圧力が0.7~1.3 Paの範囲では、残渣が発生しているが、図3(a)と(b)を比較すると、圧力が小さい方が、残渣の発生量が少なくなっていることがわかる。

図2および図3に示した結果から、基板の冷却温度を -20°C 、圧力を0.2 Paにすることによって加工面に残渣が発生しないことがわかる。

3. SiO_2 の高アスペクト比エッチング

3.1 実験条件 2章での予備的な検討結果を基に、高アスペクト比で絶縁層をエッチングするための検討を行った。エッチング時のRFパワーと反応性ガスの流量をパラメータにして加工実験を行い、 SiO_2 のアスペクト比の向上のための加工実験を行った。

表2に SiO_2 の加工条件を示す。RFパワーは、50~150 Wの範囲に設定して、加工形状に及ぼす影響を調べた。また、エッチング用のガスの流量は、表2に示す範囲で変化させて加工実験を行い、加工後の形状変化の様子を調べた。反応性ガスとして、 CF_4 の他に CHF_3 を用いた。これは、以

(a) Temperature : 0°C

(b) Temperature : -20°C

Fig. 2 Photographs of SiO_2 after etching at different temperature

(a) Pressure : 1.3 Pa

(b) Pressure : 0.7 Pa

Fig. 3 Photographs of SiO_2 after etching at different pressure

Table 2 Etching conditions of SiO₂ for high aspect ratio

Cooling temperature	-20 °C
Pressure	0.2 Pa
Flow rate of CF ₄	30 SCCM
Flow rate of CHF ₃	20, 30 SCCM
RF power	50, 75, 100, 125, 150 W

下の理由による。図3に示したように、反応性ガスとしてCF₄を用いただけでは側壁の保護の効果が小さく、通常のウェットエッチングと同様に、基板に対して面外と面内の両方向にエッチングが進行して、垂直な側壁が得られていない。高アスペクト比の加工を達成するためには、基板の面外にのみエッチングを進行させる必要がある。CHを含むガスを混入することによって、プラズマ中で活性種と反応して有機ポリマーが合成され、この反応生成物が側壁に析出することによって側壁の保護膜として作用することが予想された。このため、CF₄とCHF₃の2種類のガスを用いた。

実験は、次の手順で行った。超小型電磁モータに使用されるコイルの加工プロセスでは、まず、電気めっきの核となる電極膜の上にSiO₂を成膜する。つぎに、SiO₂をエッチングして空隙部を形成し、電気めっきで導体となるCuを充填する。このようなコイルの加工状態を模擬するため、シリコン基板上に電極膜をスパッタ法で形成した。この電極膜は、Cr/Cu/Crの3層に形成した。つぎに、プラズマCVD法により、SiO₂を約18 μmの厚さに成膜した。SiO₂の成膜後、表面にメタルマスクとして、Cr/Cuをスパッタで形成して所定のパターンにイオンビームエッチングで加工した。電極膜とメタルマスクの成膜のときにCrを形成したのは、以下の理由による。Si基板とSiO₂の上にCuを直接成膜したときには、Cuがはく離し易いが、CrはCu、SiおよびSiO₂のどれに対しても、膜のはく離が観察されなかった。Cu膜のはく離を防止するために、CuとSiおよびSiO₂の間にCrを形成するようにした。

メタルマスクの加工後、SiO₂をエッチングして断面を観察し、顕微鏡での観察結果から加工深さを測定した。

3.2 RFパワーとガスの流量が加工形状に及ぼす影響 加工結果の一例として、RFパワーが50 Wのときのエッチング後のSiO₂の断面を図4に示す。図4(a)が、CHF₃とCF₄の流量をそれぞれ20 SCCMと30 SCCMにしてエッチングした

(a) CHF₃ : 20 SCCM, CF₄ : 30 SCCM (b) CHF₃ : 30 SCCM, CF₄ : 30 SCCM

Fig. 4 Changes in side walls (RF power: 50 W)

ときのSiO₂の断面を、図4(b)が、CHF₃とCF₄の流量をそれぞれ同じ30 SCCMにしてエッチングしたときのそれを示す。図4(a)から、18 μmの深さにSiO₂をエッチングしたときには、図中に白抜きの矢印で示すように、側壁の幅方向にエッチング（以下、サイドエッチングと呼ぶ）が進行して絶縁層の幅が変化していることがわかる。図4(a)と(b)を比較すると、同じRFパワーでも、CHF₃の流量を増加させたときには、SiO₂のサイドエッチング量が減少していることがわかる。これは、CHF₃の流量の増加にともなって、CHイオンがSiO₂と反応して、側壁に保護膜を形成するためと考えられる。したがって、CHF₃の流量を増加させることによって、サイドエッチングを抑制できることがわかる。

つぎに、RFパワーをパラメータにして、加工実験を行った。図5に、CHF₃とCF₄の流量をそれぞれ同じ30 SCCMにして、SiO₂を18 μmの深さに加工したときの断面の顕微鏡写真を示す。図5に示した4種類のRFパワーに対する結果を比較すると、RFパワーが125 Wのときに良好な加工形状が得られていることがわかる。また、どのRFパワーの場合にも、加工面には残渣が発生していないことがわかる。図5中の白抜きの矢印で示した箇所に着目すると、以下のことがわかる。図5(a)~(c)に示したRFパワーが75 ~ 125 Wの範

Fig. 5 Changes in side wall shapes at different RF power (Flow rate of CF_4 and CHF_3 : 30 SCCM respectively)

囲では、RFパワーの増加とともに、サイドエッチング量が減少していること、および図5(c)と同図(d)を比較すると、RFパワーが150Wのときには、基板の底面でのサイドエッチング量は減少するが、上面でのサイドエッチング量が増加していることがわかる。

また、図5に示した結果では、絶縁層の厚さが $18\mu\text{m}$ 、幅が $2\mu\text{m}$ であるので、約9のアスペクト比が得られていることがわかる。

図6に、サイドエッチング量とRFパワーとの関係を示す。加工後の SiO_2 の幅の最大値から上部および下部の幅の差を図4(b)と図5に示した顕微鏡写真から読み取って、上部および下部のサイドエッチング量を求めた。また、図6中、○印で示したサイドエッチング量の合計は、上部と下部のエッチング量を足し合わせた値である。図6から、サイドエッチング量の合計は、RFパワーが125Wのときに最も小さくなっていることがわかる。

上部のサイドエッチング量は、RFパワーの増加に伴って大きくなり、RFパワーが150Wのときに最大となる。この結果から、RFパワーが過大になると側壁の保護膜の形成が阻害されてサイドエッチング量が増加することが推測される。一方、下部のサイドエッチング量は、RFパワーが小さいときに大きくなり、RFパワーの増加に伴って減少していることがわかる。

Fig. 6 The amount of side etching as a function of RF power

図4～図6に示した結果から、RFパワーが小さいときには下部のサイドエッチング量が大きくなって、 SiO_2 のエッチング後の形状は底辺が短い台形状となり、RFパワーが増大するにしたがって上部のサイドエッチング量が大きくなって、その形状は底辺が長い台形状に移行することがわかる。

3.3 SiO_2 のエッチングレート 図7に SiO_2 のエッチングレートとRFパワーとの関係を示す。図7から、RFパワーの増加に伴って、エッチングレートは増大していることがわかる。これは、RFパワーを大きくすることによ

って、プラズマの密度が増大するためと考えられる。ただ、RFパワーが125 Wを超えるとエッチングレートの増加割合は減少していることがわかる。これは、RFパワーが過大になると、イオンの衝撃の効果によってエッチングレートが増大して、化学反応の進行が阻害されるものと推測される。なお、サイドエッチング量が最も小さくなるRFパワーが125 Wのときのエッチングレートは、約 $0.32 \mu\text{m}/\text{min}$ であった。

3.2節と図7に示した結果から、 $18 \mu\text{m}$ の厚さの SiO_2 を加工するためには、本検討の範囲では、RFパワーを125 W、 CHF_3 と CF_4 のガスの流量を30 SCCMにすれば、ほぼ良好な形状に加工できることがわかる。

3.4 メタルマスクのエッチングレートと選択比
つぎに、メタルマスクの加工特性を調べた。前節までの SiO_2 のエッチング条件に関する検討結果から、 CHF_3 と CF_4 のガスの流量が、それぞれ同じ30 SCCMのときに、良好な加工形状が得られている。そこで、流量をこれらの値に選定し、RFパワーをパラメータにして、メタルマスクのエッチング特性を調べた。

図8に、CuのエッチングレートとRFパワーとの関係を示す。図8から、Cuのエッチングレートは SiO_2 のそれよりも1桁小さい値であることがわかる。また、RFパワーが大きくなるとCuのエッチングレートは上昇することがわかる。RFパワーが100 W以上になるとCuのエッチングレートは $0.01 \mu\text{m}/\text{min}$ 以上となり、RFパワーが50 Wのときのエッチングレートと比較して概ね1桁大きい値となる。Cuはフッ素系のガスに対し

て安定であるので、RFパワーの増加にともなうエッチングレートの増加は、イオンの衝撃に起因するものと考えられる。

図9に、選択比とRFパワーとの関係を示す。図7に示した SiO_2 のエッチングレートを図8に示したCuのそれと除した値を選択比とした。図9から、RFパワーが50~100 Wの範囲では、選択比はRFパワーの増加にともなって減少し、RFパワーが100 Wを超えると、選択比の変化の割合は減少していることがわかる。これは、RFパワーの増加にともなって、イオンの衝撃によるエッチングの進行が徐々に支配的となり、 SiO_2 の化学反応によるエッチングレートの増加割合が減少していることに起因する。また、図6に示した結果からは、RFパワーが150 Wになると急激にサイドエッチング量が増加する。一方、選択比は、150 WのRFパワーで急激に減少していない。図5(d)と図6にも示したように、RFパワーが150

Fig. 8 Etching rate of Cu as a function of RF power

Fig. 7 Etching rate of SiO_2 as a function of RF power

Fig. 9 Selectivity as a function of RF power

W のときに急激にサイドエッチング量が増えるが、これは、RF パワーの増加によって、イオン衝撃を受けて基板の上部の温度が上昇し、側壁の保護膜の形成が阻害されたためと考えられる。

本研究では、積層コイルの1層の厚さは $18\mu\text{m}$ を想定している。RF パワーが 125 W のときに、 SiO_2 は良好な形状にエッチングされ、この RF パワーのとき、 SiO_2 と Cu の選択比は 20.6 となる。したがって、 $18\mu\text{m}$ の厚さの SiO_2 を加工するために必要な Cu 膜の厚さは、約 $0.9\mu\text{m}$ となる。

4. SiO_2 のエッチング後の基板処理法

積層コイルの加工プロセスでは、エッチングの処理の後に形成された空隙部に導電材料である Cu を電気めっきで充填する。RIE 法で加工したときには、化学反応だけでエッチングが進行するのではなく、イオン衝撃の効果も観察される。 SiO_2 の下面には、電気めっきの核となる電極膜が形成されている。図 10 に模式的に示すように、電気めっきで Cu を充填するためには、 SiO_2 のエッチング時に、Cr/Cu/Cr で形成した電極膜の上面の Cr を除去しておく必要がある。この Cr の厚さは $150\text{\AA}$ であるので、 SiO_2 のエッチングと同じ条件で加工すると数十秒で除去されてしまうが、イオン衝撃の効果によって、除去された Cr およびその下面の Cu が SiO_2 の側壁に再付着する可能性が考えられる。Cr と Cu の導電材料が側壁も含めた SiO_2 の表面全体に形成されることによって、電気めっき時に絶縁層の全面で膜が成長し、 μm オーダの幅の空隙部に Cu が良好に充填できないことが予想される。

イオンの再付着による障害を防止するため、 SiO_2 のエッチング後に O_2 ガスを用いて基板をエッチング（以下、クリーニングと呼ぶ）するプロセスを追加した。本検討では、高アスペクト比の SiO_2 の加工のため、絶縁層の側壁を保護することを目的に、CH を含むガスを添加してある。このガス

Fig. 10 Schematic of etched profile for electroplating

により有機ポリマーが SiO_2 の側壁に形成され、電極膜の Cr と Cu はこの保護膜の上に再付着していると推察されたため、 O_2 ガスでクリーニングを行えば、再付着した Cr と Cu を除去できると考えた。そこで、 SiO_2 のエッチング後に、 O_2 ガスを用いたクリーニング処理を施して、Cu を電気めっきした。表 3 にクリーニングの条件を示す。圧力を大きくすることによって、等方的にエッチングが進行し、イオン衝撃の効果を抑制できると考えて、表 3 に示す圧力を選定した。

図 11 に SiO_2 の加工後に、電気めっきで Cu を約 10 分間めっきしたときの断面写真を示す。図 11(a) に示した写真が SiO_2 のエッチング直後の、同図(b) がエッチングが終了した後に表 3 に示した条件で 2 分間のクリーニングを行ってから電気めっきしたときの結果である。図 11 中、黒の矢印で示すように、他の領域と比較して明るく観察される箇所が、電気めっきで成長した Cu である。また、白の細い矢印で示した箇所はメタルマスクの Cu であり、白抜き太い矢印で示した他の領域と比較して暗く観察される領域は、断面の観察のために埋込んだ樹脂と絶縁層である SiO_2 との境界部分である。

Table 3 Cleaning conditions

RF power	50 W
Flow rate of O_2	50 SCCM
Pressure	1.1 Pa
Cooling temperature	20 $^{\circ}\text{C}$

(a) Electroplating without cleaning

(b) Electroplating with O_2 cleaning

Fig. 11 Changes in side wall surface after electroplating of Cu

図 11(a)から、クリーニングを行なわなかったときには、絶縁層の側壁全体にCu が形成されていることがわかる。メタルマスクの上にも電気めっきで形成された膜が成長していることがわかる。また、黒の矢印で示した側壁および電極膜上で顕著であるが、めっき後の表面には数 μm 以上の粒子が凝集して凹凸が形成されており、めっき膜が均一に成長していないことがわかる。これは、エッチング時の金属イオンの再付着に起因するものと想定される。

また、 O_2 ガスを用いてクリーニングを行なった後にめっきした図 11(b)に示した結果からは、側壁へのCu の形成は認められず、基板の下面の電極膜の上に電気めっきで形成されたCu が成長していることがわかる。また、メタルマスク上にはCu はほとんど成長していないことがわかる。

これらの検討結果から、 SiO_2 の加工後に表 3 に示した条件でクリーニングを行なった後Cu を電気めっきすれば、ほぼ均一にCu を充填できると考えられる。

5. 結 言

超小型電磁モータに使用される高アスペクト比のコイルの絶縁層を形成することを目的に、ECRIオン源を用いたRIE法による SiO_2 の加工特性について検討した。エッチング時のメタルマスクとしてCu を、反応性ガスとして CF_4 と CHF_3 を選定して、エッチング中の圧力、基板の冷却温度、RFパワーなどをパラメータにして加工実験を行なった結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 反応性ガスとしてエッチングを進行させるための CF_4 と側壁の保護を目的とした CHF_3 を同じ流量にしたときに SiO_2 のサイドエッチング量が減少する。
- (2) RFパワーが125 Wのときにサイドエッチング量が最も小さくなる。このときのアスペクト比は約9であり、 SiO_2 とメタルマスクの選択比は20.6である。
- (3) RIE法によるエッチングでは、イオン衝撃の効果によってエッチングされた材料が再付着するが、絶縁層の加工後に O_2 ガスでクリーニング処理を施すことにより、再付着した材料を除去することができる。

謝 辞

本研究は、経済産業省の産業科学技術研究開発制度に基づく「マイクロマシン技術の研究開発」の一環として、NEDOから委託を受けた(財)マイクロマシンセンターの再委託業務として、三菱電機(株)が実施したものである。

文 献

- (1) Mehregany, M., Nagarjar, P., Senturia, S. D. and Lang, J. H., Operation of microfabricated harmonic and side-drive motors, Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, (1990), 1-8.
- (2) Suzumori, K. and Hori K., Micro Electrostatic Wobble Motor with Toothed Electrodes, Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, (1997), 227-232.
- (3) Mikuriya, Y., Matsuzaki, K. and Matsuo, T., Fabrication and evaluation of micromotors, 1st IARP Workshop on Robotics and Systems, (1993), 98-107.
- (4) Christenson, T. R., Klein, J. and Guckel, H., An Electromagnetic Micro Dynamometer, Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, (1995), 386-392.
- (5) 林輝, 科学, 微小機械—マイクロメカニズム, 科学, Vol. 61, No. 8, (1991), 503-506.
- (6) Hamasaki, Y., and Ide, T., Fabrication of Multi Layer Eddy Current Micro Sensors for Non-destructive Inspection of Small Diameter Pipes", Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, (1995), 232-237.
- (7) Ota, H., Oda, T. and Kobayashi, M., Development of Coil Winding Process for Radial Gap Type Electromagnetic Micro-Rotating Machine, Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, (1995), 197-202.
- (8) 太田斎・山中弘美・笹倉久泰・武田宗久, マイクロマシニングによる超小型電磁モータの開発(第1報, 低残留応力の厚膜形成法の検討), 日本機械学会論文集, 68-665, C(2002).
- (9) 麻蒔立男, 超微細加工の基礎, 日刊工業新聞社, (1993).
- (10) Hayashi, H., Kurihara, K. and Sekine, M., Characterization of Highly Selective $\text{SiO}_2/\text{SiN}_4$ Etching of High-Aspect-Ratio Holes, Jpn. J. Appl. Phys., Vol 35, Part 1, No. 4B, (1996), 2488-2493.
- (11) 清水聖治・栗林勝利・大野学・植田哲生, RIEによるSi深溝エッチングにおける低温化効果, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, (1995), 395-397.
- (12) Francou, M., Danel, J. S. and Peccoud, L., Deep and Fast Plasma Etching for Silicon Micro Machining, Sensors and Actuators, Vol. 46, No. 1/3, (1995), 129-132.
- (13) Kimura, H., Shiozawa, K., Kawai, K., and Miyatake, H., Highly Selective Contact Hole Etching using Electron Cyclotron Resonance Plasma, Jpn. Appl. Phys., Vol. 34, Part 1, No. 4B, (1995), 2114-2118.