

主論文の要約

論文題目 **アモルファス合金厚膜構造体の製作方法と
MEMS への応用
(Fabrication method of amorphous alloy
thick film structure and its application to
MEMS)**

氏名 渡辺 茂高

論文内容の要約

本論文の第1章「緒論」では、本研究の背景と目的を述べている。小形化と高性能化を目指す MEMS において、設計の自由度を確保するために、MEMS を構成する機械的構造体の厚みの自由度が必要である。ただし、機械的構造体となる薄膜構造体の製作では、膜厚の増加に従い、成膜出力や成膜時間が増加し、成膜に伴い生じる熱は増加する。従って、膜厚が大きい薄膜構造体（厚膜構造体）の製作においては、熱の増加による物性の変化が問題となる。また、厚みが増加した機械的構造体では、内部応力が増加するので、その内部応力により破断しないために、より高強度な材料が必要となる。加えて、用途に適した弾性率を有する材料も必要となる事を述べている。

本論文では、このような機械的構造体には、アモルファス合金材料が適していると述べている。アモルファス合金材料は、結晶金属材料と比較して、結晶粒界に起因する破壊が発生しないために、高強度であり、加えて、シリコン材料と比べると、材料（弾性率）の選択性に優れているためである。また、過冷却液体領域を有するアモルファス合金である金属ガラスは、一般的なアモルファス合金材料に比べて熱的安定性が高く、臨界冷却速度が低いので、厚みが大きい構造体の製作が可能である。

アモルファス合金材料を用いた厚膜成膜には、スパッタ法が適していると述べている。スパッタ法は、他の物理蒸着法と比較すると、高融点、低蒸気圧の材料を成膜する事が可能であり、成膜材料の選択性に優れている。一方、厚膜の形状製作には、リフトオフ法が適している事を述べている。ただし、リフトオフ層として用いられるフォトレジストは、厚膜成膜

で生じる熱により酸素を含む脱ガスを発生させ、アモルファス合金材料を酸化・結晶化させる懸念があるとしている。また、脱ガスを発生させないメタルマスクを用いたリフトオフ法では、成膜で生じる熱や膜応力により、メタルマスクは変形し基板との間に隙間が生じる。成膜粒子は、その隙間にも堆積するので、メタルマスクの開口部に形成される厚膜構造体の断面形状が悪化する。このように、従来のアモルファス合金厚膜構造体の製作方法には課題が存在する事を明らかとしている。

以上の背景を踏まえ、本論文では、良好なアモルファス相と断面形状を持つアモルファス合金厚膜構造体の新しい製作方法の提案と評価、及び、MEMS への応用を目的としている。そして、この目的を達成するために、以下の研究を行なっている。

第2章「二重メタルマスク・リフトオフ法の提案と応用」では、二重化したメタルマスクをリフトオフ層として用いる新規リフトオフ法（二重メタルマスク・リフトオフ法）を提案している。この製作方法では、殆どの成膜粒子は、上部のメタルマスクの表面に堆積するので、成膜粒子は下部のメタルマスクの表面に堆積しにくい。このために、成膜で生じる熱応力や膜応力による変形は、上部メタルマスクに集中し、下部のメタルマスクでは抑制される。そして、下部メタルマスクは、基板への密着を維持出来るので、開口部に形成された厚膜構造体の側面形状は維持される。

二重メタルマスク・リフトオフ法と、従来のフォトレジストを用いたリフトオフ法にて、同形状の金属ガラス Cu-Zr-Ti 厚膜構造体を製作し、構造体の結晶化度と断面形状を比較している。その結果、二重メタルマスク・リフトオフ法は、従来のフォトレジストを用いたリフトオフ法に比べて、脱ガスの懸念が無く、試料の温度上昇が抑制されるので、アモルファス相を維持する事が可能である事を示している。また、二重メタルマスク・リフトオフ法は、従来のメタルマスク・リフトオフ法の問題であるメタルマスクの変形による構造体断面形状の悪化を軽減できる事を明らかにしている。

次に、MEMS への応用を目的として、二重メタルマスク・リフトオフ法を用いた複合プロセスを提案し、一軸走査ミラーデバイスの製作と駆動を試みている。複合プロセスは、アモルファス合金厚膜構造体と異種材料を形状加工、及び接合するプロセスである。製作したデバイスにおいて、はり部は、二重メタルマスク・リフトオフ法で製作した金属ガラス Cu-Zr-Ti 厚膜構造体である。ミラー部は、結晶異方性エッチングで加工した単結晶シリコン構造体である。そして、この二つの構造体の接合方法はスパッタ法を採用している。また、駆動部は、外部磁場によりトルクを得る磁石である。そして、デバイスへの磁石の接合方法は接着剤を採用している。

更に、二重メタルマスク・リフトオフ法の利点と課題を示している。その利点は、従来のフォトレジストを用いたリフトオフ法に比べて、脱ガスの懸念がなく、試料の温度上昇が抑制されるので、アモルファス相を維持可能である点であるとしている。つまり、同方法は、アモルファス合金厚膜構造体の形状製作に適しているとしている。一方、課題は、形成する構造体の膜厚が不均一となり、その断面が曲面形状となる点である。成膜粒子は、リフトオ

フ層に遮られ、リフトオフ層開口部底部の基板上に、均一に堆積しないためである。加えて、構造体の幅が異なると、リフトオフ層開口部のアスペクト比(厚さ/開口幅)も異なるので、堆積する成膜粒子の数が変化し、構造体の膜厚と断面形状が変化してしまう。そのため、構造体上面に微細加工技術を用いて電氣的要素を積層する事は困難となる。従って、二重メタルマスク・リフトオフ法は MEMS への応用を制限される事を明らかとしている。

第3章「逆リフトオフ法の提案と評価」では、先に述べた問題を解決する「逆リフトオフ法」を提案している。従来のリフトオフ法において、リフトオフ層は基板から突出しているため、成膜粒子はリフトオフ層表面へ均一に堆積していく。逆リフトオフ法は、この現象を利用した新しい厚膜構造体の製作方法である。即ち、逆リフトオフ法は、パターンニング形状の凸部を予め形成し、成膜することで、凸部表面上に膜厚が均一な厚膜構造体のパターンを形成するプロセスである。

逆リフトオフ法の実現方法として、基板とスペーサの段差により凸部を形成する手法を提案している。まず初めに、基板に貫通穴を加工し、基板より低い高さとなるスペーサを穴に挿入することで、求めるパターン形状となる凸部(基板上面)を持つ成膜治具を用意する。その基板上面へ犠牲層と厚膜をスパッタ成膜し、犠牲層を除去すれば、膜厚が均一で求めるパターン形状の厚膜構造体を作製することが出来る事を示している。

逆リフトオフ法の実例として、ステンレス鋼の成膜治具(基板とスペーサ)を用意し、上述の製作方法を用いて膜厚 10 μm と膜厚 50 μm の金属ガラス Cu-Zr-Ti 厚膜構造体を製作している。そして、構造体の膜厚と断面形状、及び構造体の裏面端部に残留したバリ形状を調査している。更に、構造体の厚膜化によって構造体形状の悪化は無い事を明らかにしている。

逆リフトオフ法と従来のフォトレジストを用いたリフトオフ法、及び二重メタルマスク・リフトオフ法を比較し、アモルファス合金厚膜構造体の製作方法としての逆リフトオフ法を評価している。その結果、0.1~1.0 mm の幅を持つ金属ガラス Cu-Zr-Ti 厚膜構造体において、従来方法では 10 % を超える最大膜厚の変化率が、逆リフトオフ法では 1 % 未満に抑制可能である事を示している。各リフトオフ法と比較すると、逆リフトオフ法では、異なる幅を持つ構造体でも膜厚は均一であり、その断面は、より矩形に近い形状となっている。加えて、構造体の上面に微細加工を用いて電氣的要素を付加する事は容易である事を示している。

更に、成膜時に熱容量が大きく脱ガスの懸念が無い材料の凸部(成膜治具)を用いる逆リフトオフ法では、脱ガス中の酸素を取り込む事で微細な核生成を発生させず、また試料の温度上昇が抑制されるので、金属ガラス Cu-Zr-Ti 厚膜構造体のアモルファス相を維持できる事を示している。以上から、各リフトオフ法に比べて、逆リフトオフ法は MEMS の機械的構造体となるアモルファス合金厚膜構造体の製作方法として適していると結論付けている。

第4章「二軸走査ミラーデバイスの製作と駆動」では、逆リフトオフ法固有の基板形状に適合する微細加工技術を示している。逆リフトオフ法では、求めるパターン形状を持つ凸部の上面に厚膜構造体が形成されるので、凸部周辺の基板にはパターン形状のネガ型の凹部

が形成される。そのため、液体を用いる微細加工技術では、処理液は厚膜構造体の上面において表面張力や遠心力で均一には広がらず、高精度の加工が困難である。また、不要になった処理液は凹部に入り込み、除去し難い傾向にある。この問題に対して、厚膜構造体上面に均一な膜厚のフォトリソ膜を形成可能な方法として、スプレーコート法とドライフィルムレジストを用いた方法を示している。加えて、凹部に処理液が残留しない洗浄・乾燥技術として、超臨界流体を用いた方法を例示している。

更に、超臨界流体を用いた洗浄・乾燥方法を用いずに、一般的な洗浄・乾燥方法を可能にする「凹部分離機構」を提案している。凹部分離機構とは、逆リフトオフ法の基板における凹部をスペーサとして分離可能にする機構である。スペーサ分離後の凹部は貫通穴となり、洗浄液は貫通穴から排水され、凹部や基板上に不要な洗浄液を残留させない。

次に、逆リフトオフ法を用いた MEMS プロセスについて述べている。具体的には、逆リフトオフ法固有の基板形状に適合する微細加工技術と、凹部分離機構を用いて、逆リフトオフ法で製作する厚膜構造体の上面に、絶縁層と電氣的配線を積層する方法について提案している。そして、提案した MEMS プロセスの実例として、二軸走査ミラーデバイスを製作している。二軸走査ミラーデバイスの基部は、逆リフトオフ法で製作した金属ガラス Cu-Zr-Ti 厚膜構造体である。そして、提案した MEMS プロセスにより、厚膜構造体上面にパリレン C 絶縁層と Au コイルパターンを積層し、最後に、製作した二軸走査ミラーデバイスの駆動を確認している。

第 5 章「結論」では、本研究で得られた結果をまとめ、今後の課題を述べている。