

学 位 論 文 題 名

レーザー照射と電気化学的手法を用いた
アルミニウムの表面微細加工

学位論文内容の要旨

近年、電子デバイスの軽薄短小化やマイクロマシンの作製を目的とした微細加工技術に関する研究開発が活発に行われている。上述の微細構造体を作製する方法として、最も数多くの研究報告があるのが、フォトリソグラフィを用いたマスクプロセスである。フォトリソグラフィは、微細構造体の大量生産が可能であるということに大きな特徴を有するが、次のような問題点を抱えている。すなわち、プロセスが多段にわたり複雑であること、多品種・少量の微細構造体作製には向いていないこと、曲面を含む複雑な形状を有する材料上にパターンを施すことが困難であること、などである。このような観点から、マスクを用いず、加工点を制御することにより、微細構造体製造を実現するマスクレスプロセスの開発が強く望まれている。現在、SPM や高エネルギービームを用いたマスクレス微細加工が提案されているが、それらは実用的な技術として採用されていないことが多い。

本研究においては、レーザー照射と電気化学的手法を組み合わせた新しいマスクレスプロセスの開発を試みるとともに、この技術を用いたアプリケーションデバイス作製について検討を行った。

本論文は7章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論であり、微細構造体作製を実現するための各種マイクロファブリケーションを概説し、それらの微細加工プロセスの問題点を提起するとともに、本論文の目的について述べた。

第2章においては、アルミニウムアノード酸化、レーザー照射、Ni 電気めっきおよびパターン転写の連続プロセスを用いることにより、微細プリント配線板の試作を試みた。アノード酸化皮膜化成試料を Ni めっき溶液中に浸漬したのち、焦点距離 20mm の平凸レンズを用いてレーザービームをライン照射すると、最小 10 μ m のライン幅で酸化皮膜が連続的に破壊・除去されることがわかった。皮膜除去部のみに Ni を電析させたのち、NaOH 溶液を用いて素地のアルミニウム金属およびアノード酸化皮膜を溶解・除去することにより、ライン幅 15 μ m、ライン間隔 25 μ m の微細金属ラインを有する模擬プリント配線板の試作に成功した。

第3章においては、レーザー照射における光学系を種々工夫することにより、ライン幅数 μ m の微細な皮膜除去ラインを形成することを試みた。焦点位置におけるレーザーのビーム径を小さくするためには、(1) 焦点距離の短い集光レンズによりレーザーを集光すること、および (2) レンズ集光前のレーザービーム径を増大することが重要であり、焦点距離 10mm の平凸レンズを用いてレーザービームを酸化皮膜化成試料に照射すると、直径 5.5 μ m の微細な皮膜除去スポットが形成できることを見い出した。また、ビームエキスパンダーを用いてレーザー

ビームの径を 25.0mm に増大したのち、収差補正された焦点距離 80mm のダブルレットレンズを用いてレーザー照射を行うと、直径 3 μm の皮膜除去スポットを形成できることを明らかにした。上述の実験結果を考慮し、アノード酸化、レーザー照射、Ni 電気めっき、およびパターン転写の連続プロセスを用いることにより、ライン幅 4 μm の微細金属ラインを有する模擬プリント配線板を形成することが可能となった。

第4章においては、厚いアノード酸化皮膜を化成したアルミニウム試料に、焦点距離 20mm の平凸レンズを用いてレーザービームを照射したさいの、酸化皮膜の破壊挙動を調査し、高アスペクト比の酸化皮膜除去ライン形成を試みた。レーザー照射による酸化皮膜の破壊は、皮膜厚さ 18 μm を境に大きく異なることがわかった。すなわち、皮膜厚さが 18 μm 以下の場合には、アルミニウム素地金属のレーザーアブレーションにより酸化皮膜の破壊が生じるのに対し、皮膜厚さが 18 μm 以上においては、サーマルショック機構により、上層部から皮膜の破壊が徐々に進行することを見い出した。また、皮膜厚さが 18 μm をこえると、均一な皮膜除去ラインを形成するのが困難であった。皮膜除去ライン形成におけるレーザー照射条件を詳細に検討し、上述の連続プロセスを用いることにより、ライン幅 30 μm 、厚さ 8 μm を有する模擬プリント配線板を形成することが可能となった。

第5章においては、アノード酸化皮膜化成、レーザー照射および電気化学的手法を用いることにより、アルミニウム表面上に微細な孔および溝を形成し、従来の機械的な方法では困難なアルミニウムのバルクマイクロマシニング法の開発を試みた。酸化皮膜化成試料を水溶液中に浸漬してレーザービームを照射することにより、析出物の汚染の無い、鋭角状の細孔を形成できることを見い出した。また、レーザー照射と電解エッチングを組み合わせることにより、半球状の細孔を形成することができた。さらに、レーザービームをライン状に照射したのち、金属露出部のみに局所的なアノード酸化を行い、酸化皮膜を溶解することにより、ライン幅 30 μm 、深さ 20 μm を有する微細な溝をアルミニウム表面上に形成できることを見い出した。

第6章においては、三次元形状を有するアルミニウム試料を用いてアノード酸化、レーザー照射、電気めっきおよび素地金属／酸化皮膜溶解の連続プロセスを行うことにより、三次元微細金属構造体の試作を試みた。アルミニウム棒状試料にアノード酸化を行うと、ある酸化時間において、酸化皮膜にクラックが生じ、酸化時間とともにクラックが大きくなることがわかった。これは、酸化皮膜に強い引っ張り応力が働いたためであると推察された。クラック形成の無いアノード酸化皮膜化成試料にレーザー照射および Ni 電気めっきを行い、金属パターンを形成したのち、試料を水酸化ナトリウム溶液中に浸漬すると、素地のアルミニウムおよびアノード酸化皮膜が溶解し、微細 Ni 構造体を分離できることを見い出した。この方法を用い、マイクロコイルやマイクロブリーなどの三次元微細金属構造体が形成できることを明らかにした。

第7章は、本論文の総括である。

本論文は、レーザー照射と電気化学的手法を用いた新しいマスクレスプロセスを開発するとともに、この手法を用いた三次元微細金属構造体の試作や素地金属のバルクマイクロマシニングが可能であることを明らかにしたものである。この新しい加工法を用いることにより、従来の方法では困難な各種三次元電子・機械デバイスを製造することができ、微細加工分野の発展に多大な寄与をもたらすものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 高 橋 英 明
副 査 教 授 瀬 尾 眞 浩
副 査 教 授 大 塚 俊 明
副 査 教 授 成 田 敏 夫

学 位 論 文 題 名

レーザー照射と電気化学的手法を用いた アルミニウムの表面微細加工

近年、電子デバイスの軽薄短小化やマイクロマシンの作製を目的とした微細加工技術に関する研究が活発に行われている。微細構造体を作製する方法として一般的なのが、フォトリソグラフィを用いたマスクプロセスである。フォトリソグラフィは、大量生産が可能であることに大きな特徴を有するが、プロセスが複雑であるとともに、複雑な表面形状の材料上にパターンを施すことが困難であるなどの欠点を有する。このような観点から、マスクレスプロセスによる微細構造体の開発が強く望まれており、走査プローブ顕微鏡や高エネルギービームを用いた方法が、数多く提案されている。

本研究においては、レーザー照射と電気化学的手法を組み合わせた新しいマスクレスプロセスの開発を試みるとともに、この技術を応用した各種デバイスの作製の可能性について検討している。

本論文は7章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論であり、微細構造体作製を実現するための各種マイクロファブリケーションを概説するとともに、本論文の目的について述べている。

第2章においては、アルミニウムアノード酸化、レーザー照射、Ni 電気めっきおよびパターン転写の連続プロセスを用いることにより、微細プリント配線板の試作を試みている。アノード酸化皮膜化成試料を Ni めっき溶液中に浸漬したのち、焦点距離 20mm の平凸レンズを用いてレーザービームをライン照射すると、最小 10 μ m のライン幅で酸化皮膜が連続的に破壊・除去されることを見出している。また、皮膜除去部のみに Ni を電析させたのち、NaOH 溶液を用いて素地のアルミニウム金属およびアノード酸化皮膜を溶解・除去することにより、ライン幅 15 μ m、ライン間隔 25 μ m の微細金属ラインを有する模擬プリント配線板の試作に成功している。

第3章においては、レーザー照射による皮膜破壊・除去によるパターンの精緻性に対する光学系および照射条件の影響を調べている。精緻なパターンを描くためには、(1) レーザービームエネルギーをなるべく小さくすること、(2) 焦点距離の短い集光レンズを使用すること、(3) 球面収差の少ないダブリットレンズを使用すること、および(4) ビームエキスパンダーにより、

レンズ集光前のレーザービーム径を増大することが重要であり、得られる皮膜除去サイズは、集光レーザービームの直径とほぼ等しいことを見出している。上述の実験結果をもとに、ライン幅 $4\mu\text{m}$ 厚さ $1\mu\text{m}$ の微細金属ラインを有する模擬プリント配線板を形成することに成功している。

第4章においては、レーザー照射による皮膜破壊・除去挙動に対するアノード酸化皮膜の厚さの影響について検討している。その結果、皮膜厚さが $18\mu\text{m}$ 以下の場合には、酸化皮膜は、アルミニウム素地金属のレーザーアブレーションにより破壊されるのに対し、 $18\mu\text{m}$ 以上においては、サーマルショック機構により、上層部から徐々に破壊・除去されることを明らかにしている。

第5章においては、アノード酸化、レーザー照射およびエッチングにより、アルミニウム表面上に微細な孔および溝を形成する方法の開発を試みている。その結果、酸化皮膜化成試料を水溶液中に浸漬してレーザービームを照射すると、切削屑による汚染のない細孔を形成できることを見出すとともに、電解エッチングを組み合わせ、半球状の細孔を形成することに成功している。また、レーザー照射／アノード酸化／化学溶解により、ライン幅 $30\mu\text{m}$ 、深さ $20\mu\text{m}$ を有する微細な溝を形成できることを明らかにしており、マイクロリアクター作製の可能性を示唆している。

第6章においては、三次元形状を有するアルミニウム試料を用い、三次元微細金属構造体の作製を試みている。すなわち、アノード酸化したアルミニウム棒状試料を回転させながら、レーザー照射を行ったのち、ニッケルめっきにより微細パターンを形成する。その後、試料をアルカリ溶液中に浸漬して素地金属およびアノード酸化皮膜を溶解すると、微細 Ni 構造体が分離できることを見出している。この方法を用い、マイクロコイル・マイクロプリー・マイクロ円筒メッシュなどの三次元微細金属構造体の形成に成功している。

第7章は、本論文の総括である。

これを要するに、著者は、アルミニウムのアノード酸化、レーザー照射と電気化学的手法を組み合わせた、新しいマスクレスプロセスを開発するとともに、微細金属パターン、微細表面加工、三次元微細金属構造体の作製技術に新知見を得たものあり、マイクロ電子・機械デバイス作製技術の開発に寄与するところ大なるものがある。よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。