

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360362

研究課題名（和文）

集積型微細電極によるマイクロプラズマモールド法の開発

研究課題名（英文）

Development of micro-plasma molding using integrated fine electrodes

研究代表者

平田 好則（HIRATA YOSHINORI）

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00116089

研究成果の概要（和文）：放電電流経路を狭窄させる窒化ケイ素(BN)ノズルと直流放電用の高速・高電圧電源を試作し、細径プラズマビームを発生させる方法を開発した。本試作装置によるプラズマビームはパワー密度 10^9W/m^2 以上に達し、ステンレス鋼陽極に直径 0.1mm の熔融スポットを形成することができた。さらに、プラズマサイズを微細化するため、BN のプラズマエッチング特性の評価および非線形光リソグラフィの高度化を行った。NLD プラズマによって、Cu マスク越しに BN のエッチングを行い、 $2.5 \mu\text{m/h}$ の除去レートを得た。

研究成果の概要（英文）：Generation method of very small size plasma beam was developed through controlling the electrical discharge in the range from glow region to arc region with use of the new type nozzle made from BN ceramics and the fast high voltage power source. The power density of newly developed plasma beam reaches higher than 10^9W/m^2 and sub-millimeter sized melt spot can be obtained at the surface of stainless steel anode. In order to obtain much smaller diameter of BN nozzle, characterizations of plasma etching properties of BN and nonlinear optical lithography were performed. The etching rate was approximately $2.5 \mu\text{m/h}$ when BN was exposed to NLD Ar plasma.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	9,200,000	2,760,000	11,960,000
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：プラズマ処理，レーザ加工，マイクロ放電

1. 研究開始当初の背景

マイクロスケールの微細なプラズマは、従来、半導体加工プロセスで志向されてきた均一性の高い大面積プラズマとは異なり、極めて

局在化しており、エッチング除去や薄膜形成、溶融・熱処理などの材料加工や合成・分析などへの応用が期待されている。近年、様々な微細プラズマを生成する手法が開発される

とともに、これらプラズマの特異性が明らかにされてきた。

我々は、これまで IC チップの $25\mu\text{m}$ 径ワイヤボンディング用ボールを形成するための放電プラズマ過程を明らかにし、実用化に貢献してきた。さらに、極細径の電極としてカーボンナノチューブ(CNT)を用い、真空環境下で CNT 先端部からの電界放出電子流を材料に照射することで、微細溶融加工の可能性を示してきた。また、集積型微細電極を作製する方法に応用できる立体的な表面加工プロセスの開発にも取り組んできた。

2. 研究の目的

本研究では、マイクロプラズマ源をチップ内に配列・集積化するための基礎研究を実施することとし、次の2項目を研究目的とした。

(1)単電極により生成した微細な大気圧プラズマを用いた材料加工プロセスの特性を明らかにする。

(2)立体的表面加工プロセスに取組み、これら微細電極を埋込むための課題を明らかにする。

3. 研究の方法

(1)単電極による微細プラズマの生成と材料加工への適用

本研究では、直流放電プラズマのグロー領域からアーク領域の広範囲で微細なプラズマを発生させるため、 $20\text{mA}\sim 1\text{A}$ の電流範囲で放電可能な無負荷電圧 1kV の直流電源と放電スタート用の 7kV 高压電源を高速スイッチで切り換えることができる電源を試作し、放電現象を高速カメラで観察するとともに、放電後の被加工材の表面を観察した。また、放電サイズを細くするため、タングステン線陰極と母材陽極との間の放電空間を制限し、放電電流を狭窄するノズルを設計・製作し、電流拘束の効果を調べた。

(2)立体的表面加工プロセス

リソグラフィ光源として、フェムト秒ファイバーレーザー(波長 780nm , パルス幅 127fs , 繰り返し周波数 100MHz)を用いた。レーザー光は対物レンズ(開口数 0.50)により、化学増幅型ネガレジスト KMPR-1000 に集光した。Cu および Ni 膜は、高周波スパッタリング法で堆積した。

4. 研究成果

(1)単電極による微細プラズマの生成と材料加工への適用

本研究のターゲットとしている微細プラズマを発生させるには、微小電流でかつ電流密度を高くする必要がある。ノズルを使用しない場合、 100mA 以上にしても放電プラズマは電極表面を左右,上下に変動し、安定しな

かった。図1は 0.3mm 孔径の窒化ケイ素(BN)製ノズルを使用したときの放電プラズマの外観を示す。図からプラズマ直径は、ノズル出口ではノズル径よりも小さくかなり緊縮しているが、陽極表面付近ではほぼ 0.3mm となっている。このノズルを使用し、 5ms 程度の単パルス放電を行うと、ほぼ 0.3mm 径の溶融スポットを形成することができる。

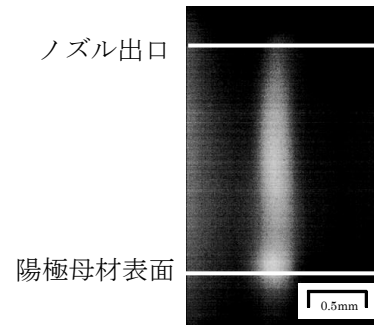


図1 単電極プラズマの放電外観
(Ar, 0.3mm 孔径ノズル, 400mA)

図2は溶融スポットの形成に及ぼすノズル孔径と放電時間の関係を示す。ノズル孔径を 0.5mm から 0.3mm に小さくすると、同一電流値においても電圧が高くなる。したがって、放電プラズマのパワー密度が高くなり、短時間の放電でも溶融スポットが形成されたものと考えられる。

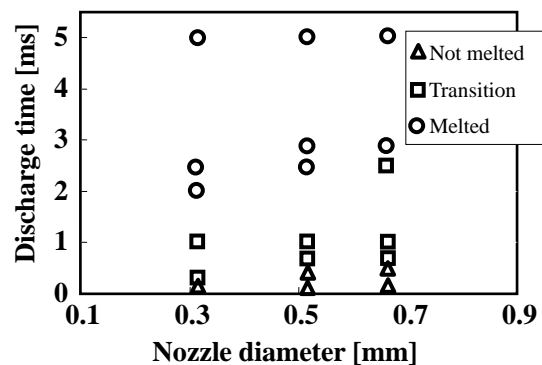


図2 母材溶融に及ぼすノズル孔径と放電時間の関係
(ギャップ長 5mm , ステンレス鋼陽極)

以上のように、BN ノズル孔径を小さくすることで、微細プラズマのパワー密度を高めることができることが明らかとなった。実用的には複数プラズマによる同時加工が要望されており、次のステップとして 0.1mm 以下の微細電極の配列、並びに各電極に対して同軸のノズル孔を形成する技術を確立する必要がある。

(2)立体的表面加工プロセス

①窒化ケイ素(BN)のマスクエッチング

窒化ケイ素(BN)は、優れた耐熱性と熱伝導性を備えたセラミックスであり、マイクロプラズマ素子の基材として有用である。将来的に、より微細な電極構造に組み込むためには半導体加工プロセスの利用が必須である。BNはSi基材料ではないため、反応性プラズマによるエッチングは困難であり、高密度なArプラズマによる物理エッチングを試みた。高バイアス電圧を印加するため、熱的に不安定なレジストではなく、放熱性に優れたCuおよびNiパターンをマスクとして用いた。垂秀囲気圧力が低くても高密度プラズマを得ることができるMagnetic Neutral Loop discharge方式で生成したArプラズマによるエッチングでは、およそ2.5 $\mu\text{m}/\text{h}$ の除去レートを得た。Niマスクではエッチング時の蓄熱により多くのクラックや剥離が生じたが、より熱伝導性に優れたCuでは顕著なマスク損傷は観察されなかった。

②非線形光リソグラフィ

立体的な電極パターン形成のため、非線形光リソグラフィの高度化に取り組んだ。高繰り返しフェムト秒レーザをレジストに集光すると露光条件によりチャンネル状のビーム伝搬が起こる[1]。この特異な伝搬はビーム集光を阻害し、加工分解能を劣化させ問題である。図3は、レジスト露光部の屈折率変化量を示している。測定は露光直後に行っており、ベイク処理などは行っていない。レーザ走査速度が30 $\mu\text{m}/\text{s}$ 以下では、露光のみで 10^{-3} ~ 10^{-2} もの屈折率変化が生じていたことが分かった。実験に用いたレジストは化学増幅型であり、リソグラフィで通常用いられる紫外露光ではプロトンが発生するだけで、その後のベイク処理ではじめて架橋反応が起こる。そのため、露光段階では、明確な屈折率の変化は観測されない。これに対し、フェムト秒レーザでは、露光のみで大きな屈折率変化が誘起された。これは100 MHzもの高繰り返しパルスであるため、露光部では、二光子吸収をトリガーとした熱蓄積効果により、光化学反応だけでなく、架橋反応も部分的に進行したと考えられる。

光改質部のサイズや入射波長から求めた規格化周波数は、後続のレーザ光に対し、入射軸に垂直な面内に光閉じ込め効果を発現するほど大きく、露光部では入射波長に対し、導波モード(単一モード)が生じ得る。開口数0.50の対物レンズでレーザ集光を行った場合、導波モードとレーザ光の結合効率は90%近い値と見積もられた。このとき、導波モードのピーク強度は、上記の光熱反応のレーザ強度閾値を超える。すなわち、露光部で生じた導波モードとの結合が、露光分解能の

劣化の直接的因子であるチャンネル伝搬の起源であると考えられた。以上の知見から、露光分解能の劣化を抑制するため、導波モードと入射レーザ光の電界分布のミスマッチを増大させることが重要となる。そこで、光改質部のサイズと屈折率変化が、導波モードの電界分布に与える影響について1次元導波路モデルを用いて検討したところ、露光部サイズが1 μm 付近より小さくなると、光改質部からの電界の漏れ出しが著しく増加し、位相不整合が顕著に増大することが分かった。そのため、露光条件により、レーザ集光レンズの開口数の適切な選択により、高い空間分解能が維持され、非線形光リソグラフィを用いた立体的表面加工の高度化に有用であることを明らかにした。

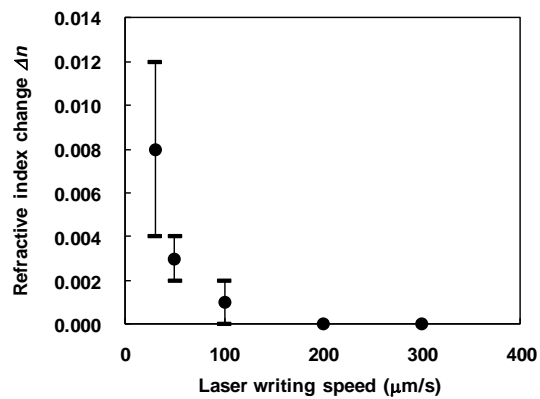


図3 フェムト秒レーザ露光による化学増幅型レジストでの屈折率変化量

参考文献

[1] H. Nishiyama, et. al., Opt. Express, 16 (2008) 17288.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

1. M. Park, 平田好則, “マイクロプラズマ溶接に関する研究”, 第18回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム論文誌, Mate2012(2012)353-358, (査読有)

2. M. Mizoshiri, Y. Hirata, J. Nishii, H. Nishiyama, “Large refractive index changes of a chemically amplified photoresists in femtosecond laser nonlinear lithography”, Optics Express, Vol. 19 (2011) 7634-7679. (査読有)

3. H. Nishiyama, Y. Sagawa, N. Furukawa, S. Okamoto, Y. Hirata, J. Nishii, “Off-axis diffractive focusing reflectors for refractive index sensing in microfluidic devices”, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 50 (2011) 06GL02-1-3. (査読有)
4. 西山宏昭, 岡本晋太郎, 佐川雄一, 平田好則, 西井準治, “オフアクシス集光型回折格子を内装したマイクロ流体素子による屈折率センシング”, 第28回センサマイクロマシンとシステムシンポジウム論文集, Vol. 1 (2011) 671-674. (査読有)
5. 西山宏昭, 平田好則, “非線形リソグラフィによるガラスの立体的表面加工”, NEW GLASS, Vol. 25 (2010) 11-15.

[学会発表] (計8件)

1. 朴ミンゴン, 浦部竜真, 平田好則, “プラズマビームプロセスに関する研究”, 溶接学会 H24 年度春季全国大会, 2012/4/10, アジア太平洋トレードセンター(大阪市)
2. 西山宏昭, 岡本晋太郎, 佐川雄一, 平田好則, 西井準治, “オフアクシス集光型回折格子を内装したマイクロ流体素子による屈折率センシング”, 第28回センサマイクロマシンと応用システムシンポジウム, 2011/9/27, タワーホール船堀(東京都)
3. 岡本晋太郎, 西山宏昭, 平田好則, 西井準治, “集光型回折格子内装マイクロ流体素子による屈折率センシング”, 第72回応用物理学会学術講演会, 2011/9/1, 山形大学(山形市)
4. 西山宏昭, 溝尻瑞枝, 平田好則, 西井準治, “フェムト秒レーザ直接重合による露光部での導波モード生成”, 第72回応用物理学会学術講演会, 2011/8/31, 山形大学(山形市)
5. M. Park, Y. Hirata and K. Nomura, “Fundamental research on micro discharge process”, ECO-MATES 2011, 2011/11/28, ホテル阪急エキスポパーク(吹田市)
6. 朴ミンゴン, 野村和史, 平田好則, “マイクロアークプロセスに関する研究(第2報)”, 溶接学会 H23 年度春季全国大会, 2011/4/22, 学術総合センター(東京都)
7. M. Park, Y. Hirata, K. Nomura, “Research on Discharge of Sub-millimeter size Process”, Visual-JW2010, 2010/11/11, ホテル阪急エキスポパーク(吹田市)
8. 朴ミンゴン, 野村和史, 平田好則, “マイクロアークプロセスに関する研究”, 溶

接学会 H22 年度秋季全国大会, 2010/9/9, 日本大学工学部(郡山市)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田 好則 (HIRATA YOSHINORI)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00116089

(2) 研究分担者

西山 宏昭 (NISHIYAMA HIROAKI)
北海道大学・電子科学研究所・准教授
研究者番号: 80403153

(3) 連携研究者

該当なし