

NLD プラズマ生成技術を用いたスパッタリングへの応用

楊 鍾煥¹⁾・川尻 晋平¹⁾・池田 一貴²⁾・本田 親久³⁾・大坪 昌久³⁾・成 烈汝⁴⁾

Neutral Loop Discharge Plasma for Sputtering Application

Jong-Hwan YANG, Shinpei KAWASHIRI, Kazutaka IKEDA, Chikahisa HONDA, Masahisa OTSUBO
And Youl Moon SUNG

Abstract

A new type of plasma system based on the Magnetic Neutral Loop Discharge (NLD) concept has been developed for sputter application. The electron density and ion current density possessing peaks at the null region, it was ascertained that the electron heating around null region is also essential for plasma production in this capacitive type null field configuration. Also, two distinctive factors, such as secondary electrons trapping and normalized electric field (F) were found to explain the measured profile of the electron temperature. From the thin film experiments, it could be found that the thickness uniformity was well enhanced with the substrate rotation and dynamical plasma control although further detail work is necessary to establish this. Furthermore, it is expected that the dynamic control of plasma over the target surface will be realized, because rotating and arranging the outer permanent magnets can actively control the position and area of magnetic null field region. With plasma application, the enhancement of target erosion and its uniformity are possible. Although further work is necessary to establish the plasma dynamic control, this magnetic null discharge concept is expected realize very uniform processing over a large area.

Key words:

Neutral Loop Discharge (NLD), Null, Sputter

1. まえがき

近年半導体デバイスにおいて、ウエハの大口径化、超微細加工が急速に進んでおり、そういった観点から、大面積にわたって一様なプラズマプロセス源が求められている。しかし現在ではマグネトロンスパッタなど、ターゲットの一部しか使用することができないため、その分コストがかかってしまうという問題点が挙げられる。そこで、このような問題点を改善するために磁気中性線放電 (Neutral Loop Discharge : NLD) プラズマが新しいプラズマプロセス源として提案された。

NLD プラズマとは、チャンバーに沿って3本のコイルを設置しそのコイルに交互に逆向きの電流を流し、それによってできた磁界によって磁場ヌル (磁場強度ゼロの点) を形成する。そのループ上に形成された磁場ヌルに沿って RF アンテナによって 13.56MHz の高周波電界を印加することによって高密度なプラズマを生成させるという原理である。NLD プラズマは電流の値を変化させることによってプラズマの動的制御が可能となり、大面積でのプラズマプロセスが可能となる。しかし従来の NLD プラズマは構造上エッチング分野にのみ制限されてきた。

プラズマ中の粒子の挙動を解明するために、ダブルプローブ法を用いて実験を行い、電子密度、電子温度、イオン電流密度を測定し、新タイプヌル磁場放電プラズマ装置におけるプラズマの構造及び特性を解明する。また、同装置において成膜実験を行い、薄膜を作成する。

1) 宮崎大学 工学研究科 電気電子工学専攻 大学院生

2) 宮崎大学 工学部 電気電子工学科学部生

3) 宮崎大学 工学部 電気電子工学科 教授

4) 宮崎大学 工学部 電気電子工学科 助教授

2. 磁場ヌル放電プラズマの装置構造および生成法

図1に、磁場ヌル放電プラズマ装置はリング状のターゲットに対して、内・外側にそれぞれ16個の永久磁石 (Neodymium Magnet Square Type、 $40 \times 7.5 \times 7$ mm、表面磁束密度 0.36T) を容量型 NLD プラズマ装置の磁石を 90° 回転させた状態で配置させる。また両装置は、ターゲットホルダーはステンレス製でリングの幅は 71.5mm であり、プラズマによる加熱を防止するために冷却水が流れるようにしてある。図2はその断面図である。永久磁石が配置されている中央部の直径 53mm の円筒型と外側の内径 204mm のリング型電極はそれぞれグラウンドシールドがなされている。ターゲットとアノードの間は 2mm 以下の間隔を置くことで不必要な放電が起らないようにしている。

また、高周波発生部は周波数 13.56MHz、最大出力 1kW の高周波電源 (ULVAC 社製) と整合器とからなる。高周波の入射パワーが一定に保てるように整合器を用いて負荷整合をとり、反射パワーをゼロにするように行った。ガスの導入は、真空チャンバー内を 10 - 6Torr 程度まで排気したあと、ガス流量コントローラーを用いてアルゴンガスが一定量流れるように制御されている。排気系はロータリーポンプと油拡散ポンプから構成されており、0.1Torr まではロータリーポンプを用いて、それ以下の圧力では油拡散ポンプを用いて排気を行っている。

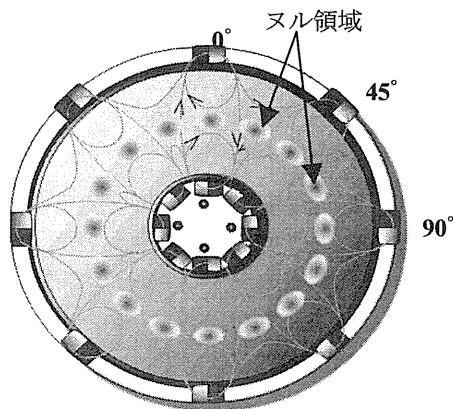


図1 磁場ヌル放電プラズマ装置の平面図

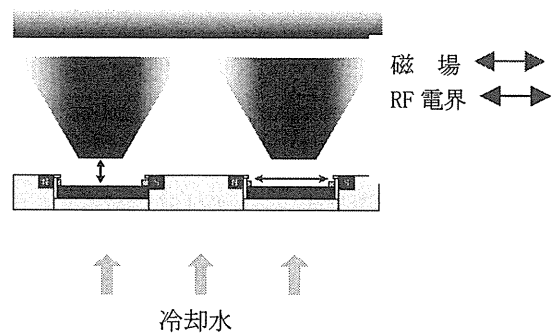


図2 磁場ヌル放電プラズマ装置の側面図

3. 磁場ヌル放電装置の電子温度・電子密度・イオン電流密度の測定結果

3.1 実験方法

ダブルプローブ法はプラズマに対して電位的に浮動な2本のプローブ間に可変電圧を印加し、プローブに流入した電流を検出し、電子温度・電子密度などの算出を行う方法である。図3.1にダブルプローブ計測システムの概略図を示す。

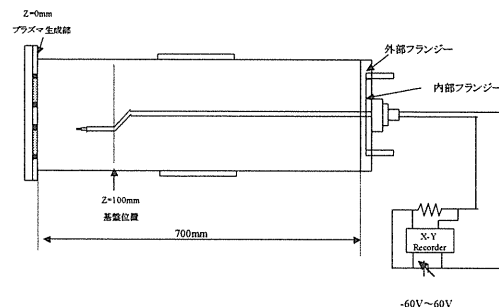


図3.1 ダブルプローブ計測システム

ダブルプローブ法の長所として、浮動電位で測定を行うため、RF放電や ECR プラズマなどの無極性プラズマにおいても、空間電位の影響を受けない。また、浮動電位付近で動作し、流れるプローブ電流はイオン飽和電流で制限されるので、シングルプローブのように電流を取りすぎることがない、イオン電流を検出するため、シングルプローブ法と比べて磁場の影響による測定誤差が少ないという利点もある。従って、磁界と高周波電界を用いて発生させる NLD プラズマ並びに磁場ヌル放電プラズマの測定においては、このダブルプローブ法が適している。

3.2 磁場ヌル放電プラズマの実験結果

ターゲットから 20mm 離れた位置における電子密度・電子温度・イオン電流密度を 2 重回転式ダブルプローブ計測システムにより測定を行った結果を示す。各実験条件はアルゴンガス圧 3 mTorr、高周波電源の周波数は 13.56MHz、パワーは 300W、永久磁石の表面磁束密度は 0.4T、測定半径はヌル領域半径(54mm) を通る場所を含め内側から 11.6mm の間隔で合計 5 箇所である。磁石配置 0° の時のイオン電流密度、電子密度の測定結果を図 3.2・図 3.3 に示す。また、図 3.4 は外側の磁石配置を 22.5° ずらした時の電子密度の測定結果を示している。

磁石配置 0° の時、イオン電流密度、電子密度共に同じ磁場ヌルの場所でもっとも高くなることが図 3.2・図 3.3 より明らかとなった。

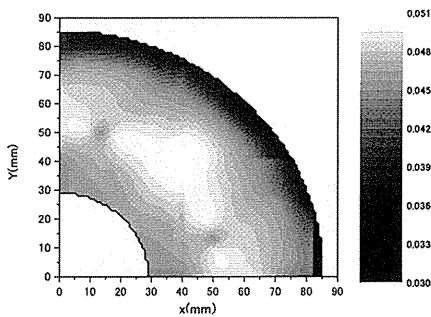


図 3.2 イオン電流密度分布 (A/m²) (磁石配置 0°)

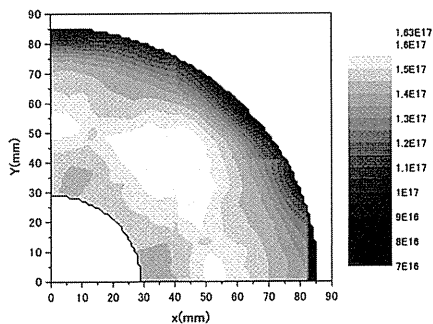


図 3.3 電子密度分布 (m³) (磁石配置 0°)

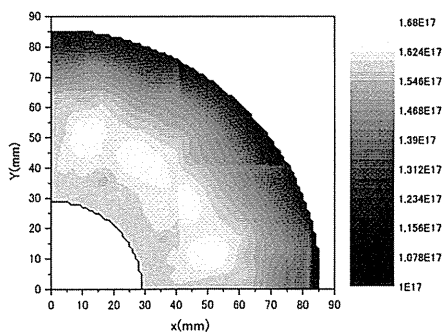


図 3.4 電子密度分布 (m³) (磁石配置 22.5°)

磁石配置 22.5° の時、電子密度の測定結果は磁場ヌル

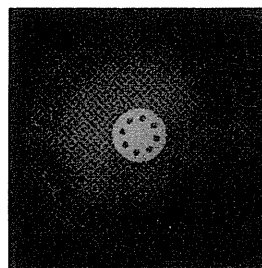
の位置 (半径 54mm の場所で 11.2°、33.7°、56.2°、78.7°) でそれぞれピークを持つことが確認できた。このことより磁石の配置を変えることによってプラズマの動的制御が出来るといえる。また、容量結合型 NLD 装置とは違い E×B の影響をうけていないので、安定したプラズマ動的制御が可能であると期待が出来る。

4. 磁場ヌル放電プラズマの発光特性

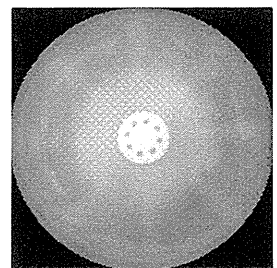
磁場ヌル放電プラズマの発光写真を図 4.1、図 4.2 に示す。ヌル領域 (r=54.3mm, θ=0°)、(r=54.3mm, θ=22.5°)、(r=54.3mm, θ=45°)、(r=54.3mm, θ=67.5°)、(r=54.3mm, θ=90°) 付近が強くなるのと考えられているが、ヌルの位置が非常に近いため発光写真ではヌル近傍で強く輝いていることだけが、確認できた。これは容量結合型 NLD と同様に、電子と Ar 原子の衝突が起こり、Ar 原子を電離させ、励起原子密度が磁場ヌル付近で高くなっていると考えられる。発光も一様に見られるので低圧力では、E×B ドリフトの影響を受けていないと考えられる。

永久磁石の表面磁束密度を 0.4T の状態で、圧力を変化させた場合の放電発光写真を図 4.2 に示す。放電条件は (a) ガス圧力=0.5mTorr、RF 出力=300W、(b) ガス圧力=0.6mTorr、RF 出力=300W、(c) ガス圧力=0.7mTorr、RF 出力=300W、(d) ガス圧力=1.0mTorr、RF 出力=300W、(e) ガス圧力=4mTorr、(f) ガス圧力=5mTorr である。

今回の放電実験においては、0.5mTorr 以下の圧力でも放電していることが確認できた。逆に、圧力を上げていくと電子の E×B ドリフトによるマグネトロン放電⁽²³⁾ が混在してくる。これは、ターゲットの外側付近 (r=100mm) において、電子が磁場にトラップされることによるものである。このことから、磁場ヌル放電プラズマは永久磁石の表面磁束密度が 0.4T の時は、1mTorr 以下の圧力でマグネトロン放電より磁場ヌル放電プラズマが相対的に強くなることが明らかになった。



(a) 圧力 0.5mTorr



(d) 圧力 1mTorr

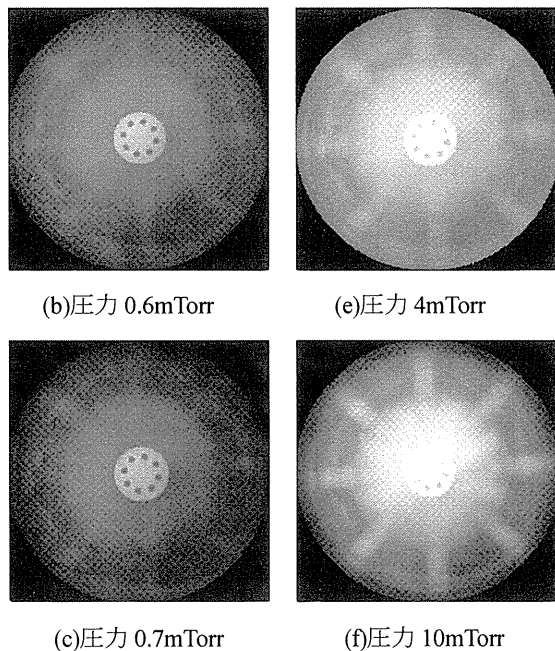


図 4.1 圧力を変化させた時の磁場ヌル放電プラズマの発光写真

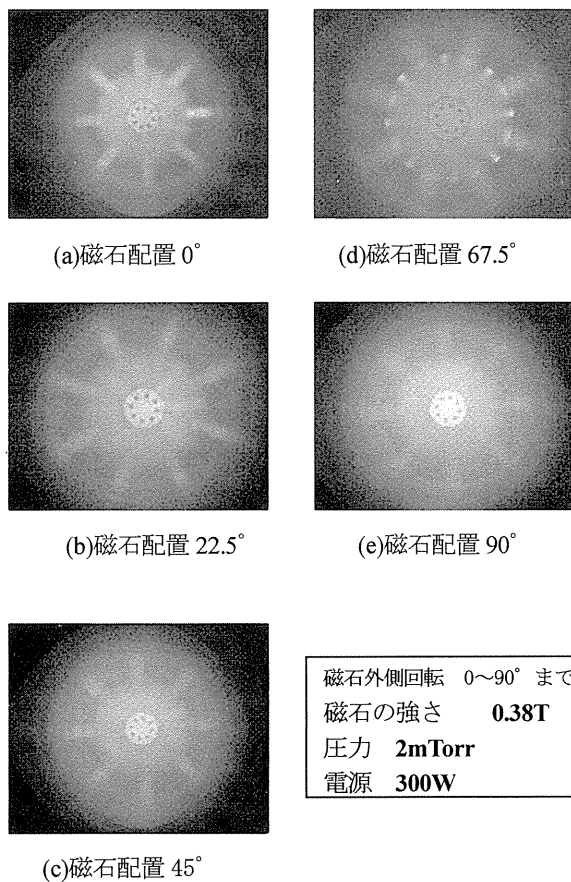


図 4.2 外側磁石を回転させた時の磁場ヌルプラズマの発光写真

5. 磁場ヌル放電プラズマの薄膜分析結果

5.1 磁場ヌル放電プラズマと容量結合型 NLD プラズマのヌル領域での成膜特性の比較

磁場ヌル放電プラズマ及び、容量結合型 NLD プラズマによる Cu 薄膜を図 5.1 に示す。(a) は磁場ヌル放電プラズマ装置における Cu 薄膜の SEM 像である。ヌル磁場の位置(54mm、90°)で、実験条件として、ガスはアルゴンを使用し、圧力 5mTorr、永久磁石の表面磁束密度は 4000Gauss、電源は 300W である。ターゲットは Cu で、Si 基板との距離は 100mm とした。スパッタ時間は 1 時間で行った。(b) は、容量結合型 NLD プラズマ装置の同じ条件下での SEM 像である。

磁場ヌル放電プラズマを用いた場合、膜厚が約 170nm であり実際の容量結合型 NLD プラズマと比較すると、30nm 程度スパッタ速度が遅いことが分かる。このことよりスパッタ速度は磁場ヌル放電プラズマより容量結合型 NLD のほうがやや優れているといえる。

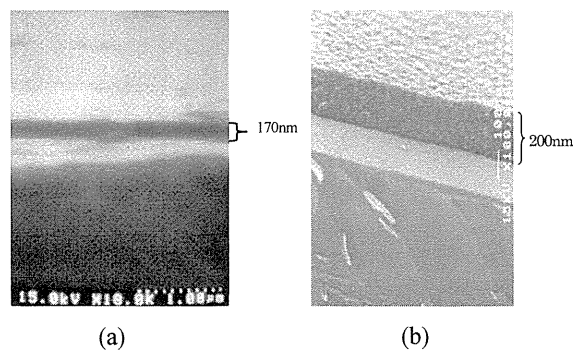


図 5.1 Cu 薄膜の比較

5.2 ヌル領域及びそれ以外の領域における成膜特性の比較

磁場ヌル領域及びそれ以外の領域で成膜実験を行った。実験条件としては、電源 400W、ガス圧 5mTorr、磁石強度 4000Gauss、ターゲットからの距離 100mm である。ウェハー位置は図 6.1 に示すように、①～⑤の箇所に設置し、場所による成膜の変化を確認した。それぞれの位置での Cu 薄膜の SEM 像を図 6.2 に示す。図 6.2 より、ヌル領域及びそれ以外のどの領域においても膜圧が均一であるということが明らかとなった。これは容量結合型 NLD と比べヌル領域が多いので基盤から 100mm 離れた場所では何所も一様に薄膜されるということが考えられる。この結

果より、磁場ヌル放電プラズマは、容量結合型 NLD では困難であった均一成膜が、可能であるといえる。

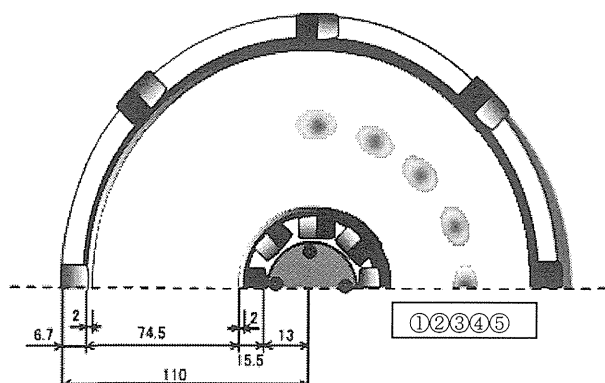


図 6.1 成膜実験位置図

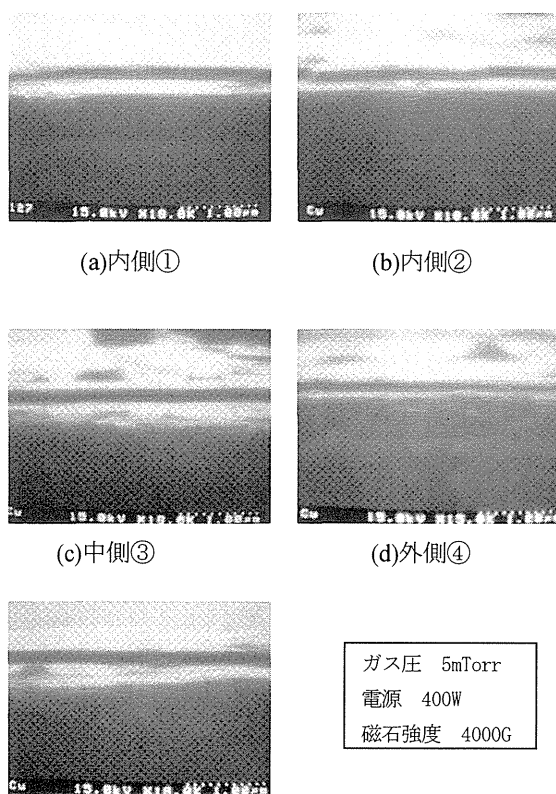


図 6.2 磁場ヌル領域及びそれ以外の場所での SEM 像 (Cu)

7. まとめ

ダブルプローブ法により容量結合型 NLD プラズマ並びに磁場ヌル放電プラズマ中の電子温度・電子密度分布の測定を行い以下の結果を得た。

I. ダブルプローブ法により容量結合型 NLD プラズマ並びに磁場ヌル放電プラズマ中の電子温度・電子密度分布の測定を行い以下の結果を得た。

磁場ヌル放電プラズマのターゲット表面上の電子密度とイオン電流密度測定を行った。磁場ヌル放電プラズマの場合、磁石配置 0° の時は電子密度、イオン電流密度は容量結合型 NLD 装置と同じようにヌル領域である半径 54mm の 0° 、 22.5° 、 45° 、 67.5° 、 90° の位置にピークを持つ分布となった。さらに磁石を 22.5° 回転させた場合もヌル領域と同じようにそれぞれ 11.3° 移動していることが明らかとなった。これにより磁場ヌル放電プラズマではプラズマの動的制御が可能であると期待できる。

II. 磁場ヌル放電プラズマの発光写真

磁場ヌル放電プラズマの場合、永久磁石の表面磁束密度が 0.4T で、Ar ガスが 1mTorr の時に磁場ヌル領域近傍が強く発光していることが確認できた。このことよりプラズマがヌル領域で強く発生していることがいえる。磁石の磁力を一定にしたまま、圧力を上げていくと、低い圧力から高い圧力までプラズマの形が変わることがなかった。これは $E \times B$ の影響を考慮した磁石配置にした為である。また外側の磁石を回転させたときのプラズマを確認すると発光も 22.5° 、 45° と回転していることが分かる。これは電子による $E \times B$ ドリフトの影響も考慮しているので、プラズマの動的制御は容易にでき、安定したプラズマを作ることができるということがいえる。

III. 磁場ヌル放電プラズマスパッタ装置で薄膜の作成を行い、その特性を調べ以下のような結果を得た。

1) 容量結合型 NLD プラズマ及び磁場ヌル放電プラズマ装置を用いて、Cu ターゲットを用い、ヌル領域での薄膜の比較を行った。その結果、ヌル領域においては、容量結合型 NLD プラズマの方が成膜速度が速いという結果となった。

2) ヌル磁場放電プラズマ装置においてヌル領域とそれ以外の領域で薄膜を作成し、その比較を行った。その結果、磁場ヌル放電プラズマでのスパッタ成膜においては、ヌル領域とそれ以外の場所で同じ膜厚となっていることが確認できた。成膜速度は容量結合型 NLD よりや

や成膜速度はおとるが、ヌル領域の数が容量結合型 NLD に比べ多いためそれ以外の場所にも均一に成膜されたということが明らかとなった。これにより、容量結合型 NLD 装置では困難であった均一成膜が可能になる利点を持っていることが明らかとなった。

参考文献

“A Novel Sputter System with Dynamically Controlled Plasma”, Y.M. Sung, S. Atsuta, J.H. Yang, M. Otsubo, C. Honda, IEEJ Trans. FM, Vol.124, No.7, 2004

“Null Plasma Source for Thin Film Fabrication”, M. Sung, S. Kawashiri, J.H. Yang, M. Otsubo, C. Honda, Joint International Plasma Symposium of 7th APCPST and 16th SPSM, 2004

“A Novel Sputter System with Full Target Erosion”, S. Atsuta, J.H. Yang, S. Kawashiri, T. Yuji, Y.M. Sung, M. Otsubo, C. Honda, Proc. of 2003 Japan-Korea Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, 2003

“磁場ヌル放電プラズマの動的制御に関する基礎特性”, 敦田 悟, 楊 鍾煥, 川尻晋平, 成烈文, 大坪昌久, 本田親久, 第 56 回電気関係学会九州支部連合大会, No. 03-2A-17, 2003