Development of large diameter plasma sources for semiconductor processes

半導体プロセス用大口径プラズマ源の開発

Haruo SHINDO

*Department of Applied Physics, School of Engineering, Tokai University,
Kitakaname 1117, Hiratsuka 259-1292, JAPAN*

TEL:+81-463-58-1211, FAX+81-463-58-9461, E-mail:hshindo@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

(Received 1, December 1999 Accepted 28, April 2000)

For ultralarge-scale integrated(ULSI) circuit processes, two types of large-diameter plasma generation methods were studied. The one is a microwave plasma by employing a high-permittivity material window. The plasma was produced by the surface-wave and thus the density enhancement was observed with the high permittivity of the dielectric window material. The method was emphasized to be promising in producing a large-diameter plasma for ULSI processes, in particular for photo-resist ashing. Another source is an RF plasma by employing a multimode antenna. A newly designed antenna with several loops and different modes enabled a large-diameter plasma production having a function of electron energy control. The electron energy was reduced by changing the azimuthal mode of antenna from $m=0$ to $m=2$ with no notable change in electron density. Thus it was concluded that the characteristic length for induction field reverse was essential in conjunction with electron free path.

KEYWORDS: large-diameter plasma, surface-wave plasma, inductively coupled plasma, high-density plasma, resist ashing, ULSI plasma processes

I. INTRODUCTION

集積回路(LSI)プロセスにおけるウエハ径の12インチ化および最小加工寸法の0.1ミクロン化は目前に迫り、各プロセスの技術的対応が急務となっている。中でも、プロセスにプラズマを利用するエッチング、CVD、アッシング等のプロセスでは、微細加工用の大口径高密度プラズマ源の開発が強く望まれている。

次世代プラズマプロセス技術の研究課題をその重要性の順に述べると(1)プロセス装置の大口径化、(2)プロセス速度の高速化、(3)プロセスウインドウの拡張化である。本研究では、これらの研究課題を抜本的に解決することを目的として、次世代の新しい高密度プロセスプラズマ源の開発を目標とする。具体的に上記(1)および(2)の研究課題については新プラズマ発生方式の導入が必要で、特に高周波プラズマでは電力導入用のアンテナ形状が問題となる。また、(3)研究課題についてはプラズマ電子のエネルギー制御の技術に帰

着する。このような研究課題に対して本研究は次の2つの方式による大口径プラズマ源の開発とそのプロセス応用について実験研究を行ったものである。①高誘電率誘電体導入窓による大口径表面波プラズマの生成とレジストアッシング技術の開発。^{1,2} ②マルチモードアンテナによる大口径RFプラズマの生成とSiO₂/Si選択エッチング技術。³ これら2方式によるプロセスプラズマについて結果を述べる。

II. MICROWAVE PLASMA PRODUCED BY EMPLOYING HIGH PERMITTIVITY WINDOW.

A. Experimental apparatus and method

Figure 1には本研究で用いたマイクロ波プラズマ実験装置図を示す。2.45GHzのマイクロ波をTE₁₀-TM₀₁モード変換器を通して導入し、直径240φのアルミ容器内にプラズマを生成した。プラズマ容器のマイクロ波導入部には次の3種類の方法を用い、プラ

ズマ特性の違いを比較した。(1) 13mm厚石英円板、(2) 7mm厚石英円板、(3) 7mm厚アルミナ円板。ここで2種類厚の石英円板を用いた理由は、誘電体窓の誘電率の影響を調べる上で厚さを揃える必要があり、そのため7mm厚石英円板およびアルミナ円板を用意したが、石英は強度的に弱く、通常の実験は13mm厚石英円板を用いる必要があるためである。本実験で用いた石英円板とアルミナ円板の電気的特性は、石英の場合で誘電率がどちらの場合とも3.8程度であり、アルミナの場合で9.7と誘電率は3倍近くも大きい。生成したプラズマの診断は直径1-0.5φの白金製平面ラングミュアプローブを用いて行った。なお、本実験における位置の基準は図1に示すように、軸方向Zについては石英およびアルミナ円板の下面であり、半径方向については中心軸である。以後、測定値はすべてこの座標系で示される。

また、1μm厚でi線用レジストを塗布したシリコン基板を加熱銅電極上に設置し、各プラズマ条件に対するレジストアッシング速度を調べた。基板温度は200-300℃である。なお、基板の電気的条件は浮遊電位である。

FIG.1 Experimental apparatus.

B. Experimental result and discussion

1. Microwave power dependences

Figure 2 には圧力0.1Torrの酸素プラズマにおいて得られた電子密度のマイクロ波電力依存性を示した。測定の軸方向位置は $Z=5.8\text{cm}$ である。マイクロ波導入部形状としてはアルミナ板(7mm)、7mmおよび13mm厚石英板の3種類である。マイクロ波電力の増加とともに電子密度はどの条件においても増加するが、その依存性はマイ

クロ波導入部により大きく異なる。特にアルミナの場合にはその依存性は強く、マイクロ波電力1kWにおいて $6 \times 10^{11}(\text{cm}^{-3})$ 程度で、これは同一厚さの石英と比較して2倍もの高密度になっている。このようなアルミナの場合における電子密度の強いマイクロ波電力依存性にはアルゴンの場合と同様にアルミナの高誘電率および低誘電体損の特性が関係しており、表面波によるプラズマ生成の特徴であることが後で示される。更に、アルミナの場合におけるマイクロ波電力依存性において低電力領域では不連続な変化が見られる。このような低電子密度領域における異常な変化には表面波の発生限界が関係している。これについては後述する。一方、電子温度の測定値ではアルミナの場合の特に低マイクロ波電力の領域で極端に高くなる傾向が見られた。この極端な変化は電子密度の場合の不連続的な変化に対応したもので、この原因としては表面波の発生限界が関係している。また、その他の導入法においては電子温度の電力依存性は弱い低電力の領域で電子温度が高くなるようなアルミナと同様の傾向が僅かに見られた。

FIG.2 Power dependences of electron density.

2. Axial distributions of parameters.

Figure 3 においては、圧力0.1Torrにおける電子密度および電子温度の軸方向依存性を3種の導入法について比べたものである。いずれの導入法でも電子密度はマイクロ波導入部へ近づくに従って増加し、アルミナの場合には $10^{12}(\text{cm}^{-3})$ にもなる。一方、電子温度では導入法による大きな差は見られなかった。アルミナの場合の電子密度変化を石英円板と比べると、圧力が0.1Torrのときアルミナでの密度は下流域まで石英円板を上回るが、これはマイクロ波モード観察の結果、表面波モードが(1, 0)のように中心部に集中しているためであることが明らかとなった。これに対し、石英円板では軸方向分布が平

坦になるような傾向にあり、明らかに表面波モードからはずれる傾向にある。

3. Microwave dispersion and plasma parameters.

実験結果で示したように、酸素プラズマのマイクロ波電力依存性および圧力依存性よりアルミナを導入部とした場合のプラズマ電子密度は大きく増加し、マイクロ波カットオフ密度 $7.4 \times 10^{10} (\text{cm}^{-3})$ 以上になることがわかった。これらの結果より、マイクロ波導入部誘電体とプラズマ界面を伝搬する表面波が関与していることが考えられる。プラズマ密度が増加し、マイクロ波周波数のカットオフ密度以上になるとマイクロ波はプラズマボリューム内に進入できず、誘電体とプラズマの界面に局在するようになり、これが表面波モードを作り出す。誘電体境界では電束密度が連続であり、その結果プラズマ誘電率が誘電体のそれと等しくなるように、高誘電率の場合にはプラズマ密度が増加しなければならない。これが本実験においてアルミナ窓で高密度を発生するメカニズムであり、この高密度プラズマが界面付近に局在するのが特徴となる。

4. Resist ashing characteristics

Figure 4 には圧力1Torrにおいて得られたレジストのアッシング速度をアルミナおよび石英の場合について比較して示した。

FIG.3 Axial variations of electron density.

III. HIGH DENSITY RF PLASMA PRODUCED BY EMPLOYING MULTI-MODE ANTENNA.

低圧高密度プラズマによるULSIエッチングでは、高選択性の確保や形状異常の防止等の観点よりプラズマ電子のエネルギー制御が強く望まれている。例えば、 SiO_2/Si 選択エッチングでは、垂直形状を確保するため

FIG.4 Comparison of resist ashing rates.

に、出来るだけ低圧条件でエッチングを行う必要があるが、低圧条件で高密度プラズマを生成すると、電子エネルギーが過度に上昇し、ラジカルが過度に分解され、選択性が確保出来なくなる等の問題が発生している。誘導結合型プラズマ(ICP)において生成用アンテナの方位角方向モードを変えることにより誘導電界の反転領域が変わるが、本実験では、この反転領域の寸法を変えることにより電子エネルギーの制御を試みた。

A. Experimental apparatus and method

Figure 5に示すように、14インチSUSチャンバー内に石英窓を介して銅板製一巻きアンテナにより13.56MHz RF電力を供給し、アルゴンプラズマを生成した。アンテナの方位角方向モード m を変え、生成されるプラズマの電子エネルギーおよび電子密度の相違を主に調べた。アンテナの方位角方向モードは図中に示すように、RF電力のフィード点を変えることにより、変化させた。生成したアルゴンプラズマはラングミュアプローブおよび発光分光分析法により診断を行った。発光分光分析は軸方向位置 $z = 9.5 \text{ cm}$ の位置で横方向よりレンズおよびファイバーを組み合わせて原子線およびイオン線の強度測定を行った。

B. Experimental result and discussion

1. RF power dependences

Figure 6にはモード数 $m = 0$ および1において圧力1mTorrで得られた電子密度、温度のRF電力依存性を示した。電子温度は予測の通り $m = 1$ モードで50%程度 $m = 0$ の場合より低く、この傾向はRF電力により大きな変化は見られない。一方、電子密度はRF電力1、5kWを境に逆転し、高電力領域では $m = 1$ モードが高密度となる。このような密度の逆転はアンテナ直径が大きくなると高電力側に移動した。Figure 7には同一条件で得られたArI及びArII線スペクトルの $m = 1$ に対する $m =$

FIG.5 Experimental apparatus.

FIG.6 Power dependences of Ne and Te.

0の強度比を示した。発光強度の変化はFigure 6のプロブ測定による結果を良く説明している。発光分光分析ではさらに他のArI及びArII線強度も測定したがFigure 7とほぼ同様の結果であった。Figures 6、7の結果はアンテナモード数を変えることにより高電子密度で低電子温度のプラズマが実現出来ることを示している。アンテナの方位角方向モードが増えると、誘導電界による電子の加速距離が減少し、この距離よりも電子の平均自由行程が長い場合には、電子は加速と同時に減速の効果を受けるようになり、電子エネルギーの低減化が起これと考えられる。これらの結果は低圧高密度プラズマによるULSIエッチングにおいて極めて重要であり、実際のエッチングにおいて高選択性の確保や形状異常の防止等が可能になると考えられる。

ACKNOWLEDGMENTS

本研究の一部は東海大学におけるレインボー21プロジェクト研究として行われたものであり、ここに記して謝意を表します。

REFERENCES

- ¹ M.Furukawa, N.Saito, K.Kawamura, and H.Shindo, Jpn. J. Appl. Phys., 37(8B), pp.L1005-L1007(1998).
- ² M.Furukawa, K.Shinagawa, K.Kawamura and H. Shindo, Jpn. J. Appl. Phys., 38((8), PP.4905-4909 (1999).
- ³ H. Shindo, T.Urayama, T. Fujii, Y. Horiike and S.Fujii, Jpn. J. Appl. Phys., 38((9AB), PP.L1066-L1069 (1999).

FIG.7 Power dependences of line intensities.

進藤 春雄 (しんどう はるお)

昭和22年2月20日生

昭和46年3月 秋田大学大学院修士課程修了

昭和46年4月 広島大学助手

平成4年4月 福山大学助教授

平成7年10月 東海大学応用物理学教授

現在に至る。

この間、プラズマ物理および応用に関する研究に従事。