

半導体・液晶プロセスに対応した高密度プラズマ源

High-Density Plasma Sources for Semiconductors and TFT-LCD Processes

青木 克明
AOKI Katsuaki

鈴木 啓之
SUZUKI Hiroyuki

山内 健資
YAMAUCHI Takeshi

半導体デバイスの高集積化や液晶パネルの高性能化のため、微細化プロセスへの要求はますます厳しくなっている。これを実現するための重要な技術の一つに、電子密度 $10^{11} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 程度の高密度プラズマ源を用いたドライプロセスがある。しかし、実際の生産ラインでは、プロセスの制御性、実現性など多くの課題がある。

当社は、これらの課題を解決するため、表面波プラズマや誘導結合型プラズマ(ICP)などの高密度プラズマ源を独自に開発し、エッチング装置及びアッシング^(注1)装置として実用化している。しかし、デバイスのよりいっそうの微細化や大型化に対応するため、より大面積で制御性の優れた、スロットアンテナプラズマ、アンテナ内挿型ICPなどの高密度プラズマ源を開発している。

Microprocessing is necessary to realize the high-density integration of semiconductor devices and the high performance of thin-film transistor liquid crystal display (TFT-LCD) substrates. As one of the techniques for achieving this, we use a dry process to which we apply high-density plasma sources with an electron density of approximately 10^{11} to 10^{13} cm^{-3} . However, many problems must be solved in order to use such plasma sources in actual production.

We have newly developed several high-density plasma sources, including surface wave plasma (SWP) and inductively coupled plasma (ICP), and practically applied them to etching and ashing processes. To improve the controllability of plasma sources for large-size substrates and ion and radical species, we have also developed advanced plasma sources called slot-antenna plasma and inner-antenna ICP.

1 まえがき

プラズマを用いたドライプロセスは、半導体、液晶製造工程のエッチング、アッシング、CVD(Chemical Vapor Deposition: 化学気相成長)、そしてスパッタリングなどのプロセスに広く使用されている。これらのドライプロセスでは、半導体や液晶の微細化への対応と、生産性向上の面から、プロセス制御性の向上と高速化が強く求められている⁽¹⁾⁽²⁾。半導体や液晶のドライプロセスに用いられるプラズマ源とその性能を比較したものを図1に示す。容量結合型プラズマ(CCP: Capacitively Coupled Plasma)では、電極間に発生するRF(Radio Frequency)電界を用いプラズマを生成するため、イオンフラックスとイオンエネルギーを独立に制御できない。このため、エッチング形状や選択性を自由にコントロールするには限界がある。また、電子密度も 10^{10} cm^{-3} 程度と、プロセス処理速度の向上にも限界がある。一方、誘電体窓を通して誘導結

較したものを図1に示す。容量結合型プラズマ(CCP: Capacitively Coupled Plasma)では、電極間に発生するRF(Radio Frequency)電界を用いプラズマを生成するため、イオンフラックスとイオンエネルギーを独立に制御できない。このため、エッチング形状や選択性を自由にコントロールするには限界がある。また、電子密度も 10^{10} cm^{-3} 程度と、プロセス処理速度の向上にも限界がある。一方、誘電体窓を通して誘導結

(注1) エッチングする際にマスクとして用いたフォトレジストを、灰化して取り除くことをアッシングと呼ぶ。

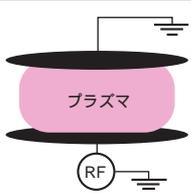
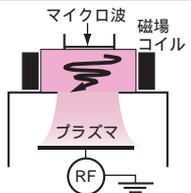
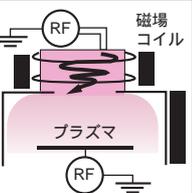
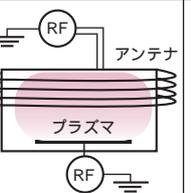
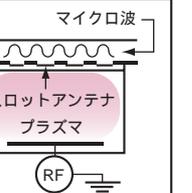
項目	CCP	ECR	HWP	ICP	SWP
構成					
放電圧力(Pa)	10 ~ 100	0.05 ~ 0.5	0.05 ~ 1	0.05 ~ 1	1 ~ 100
プラズマ密度(cm^{-3})	$\sim 10^{10}$	$\sim 10^{12}$	$10^{12} \sim 10^{13}$	$\sim 10^{12}$	$\sim 10^{12}$

図1. ドライプロセスで用いられるプラズマ源 CCP以外の高密度プラズマでは、イオンフラックスや、イオンエネルギーをそれぞれ独立で制限できるため、エッチング形状の制御や、下地との選択制御が容易であり微細化に対応できる。

Plasma sources for dry process

合や表面波によりプラズマを生成するCCP以外のプラズマには、電子サイクロトン共鳴プラズマ(ECP: Electron Cyclotron resonance Plasma),ヘリコン波励起プラズマ⁽³⁾(HWP: Helicon Wave Plasma),誘導結合型プラズマ⁽⁴⁾(ICP: Inductively Coupled Plasma),マイクロ波励起表面波プラズマ⁽⁵⁾⁽⁶⁾(SWP: Surface Wave Plasma)などがある。これらのプラズマ源では、放電パワーによるイオンフラックスの制御と、バイアスパワーによるイオンエネルギーをそれぞれ独立で制御できるため、エッチング形状の制御や、下地との選択比制御が容易である。また、 $10^{11} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ と高い電子密度が得られる。

この中で、当社は、スロットアンテナプラズマ⁽⁷⁾⁽⁸⁾,アンテナ内挿型ICP⁽⁹⁾などの高密度プラズマ源を開発し、ドライエッチング,アッシングプロセスに適用を進めている。ここでは、微細化に対応したドライエッチングに対してプラズマ源と、プロセス性能,及び今後の技術課題について述べる。

2 スロットアンテナプラズマ源⁽¹⁰⁾

2.1 表面波プラズマの生成と半導体プロセスへの応用

アッシング装置用に開発した、スロットアンテナプラズマ源の概略を図2に示す。マイクロ波を伝播(でんぱ)する導波管の下面にスロットアンテナと呼ばれる細い間隙を設け、マイクロ波を放射する。このとき、放射強度(R)は式(1)で表される⁽¹¹⁾。

$$R \propto \text{スロットアンテナで散乱される波の強度}(S) \quad (1)$$

このとき、スロットアンテナがマイクロ波の進行方向に対して平行としたときに S つまり R が最大となる。更に、導波管端部に2本設けたとき R は最大となり、効率的にプラズマを

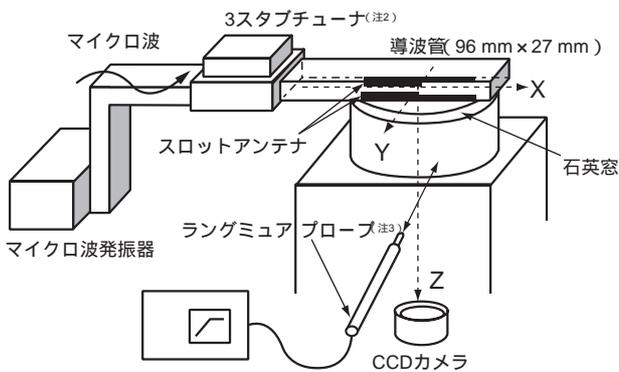


図2. スロットアンテナプラズマ源の概要 2.45GHzのマイクロ波をスロットアンテナで放射し、表面波を伝播させ、均一なプラズマを生成する。

Schematic diagram of slot-antenna plasma source apparatus

(注2) インピーダンスをマッチングさせる。
 (注3) 電子密度測定器のプロープ(探針)
 (注4) 0.1 ; 1 気圧, 標準密度における標準 cm^3/min のこと。

生成できる。しかも、表面波が誘電体上を広範囲に伝播するので、均一で高密度なプラズマを生成させることができる。また、スロットアンテナの長さを管内波長とすることでプラズマがもっとも広がることも実験的に明らかにした。240 mm誘電体窓の場合のスロットアンテナによる酸素(O_2)プラズマでの放電を、CCD(電荷結合素子)カメラによって撮影したものを図3に示す。種々の実験から、マイクロ波入射側のスロットアンテナ幅15 mm,長さを85 mm,反射端側を幅11.5 mm,長さを85 mmとしたスロットアンテナ形状により透過窓の石英全面にわたって均一なプラズマを生成することができた⁽¹¹⁾。このスロットアンテナにより生成されたアルゴン(Ar)プラズマの電子密度及びイオン飽和電流密度分布を、Langmuirプローブで測定した結果を図4に示す。図から明らかなように、電子密度分布は上に凸型を示し、最大の電子密度はダウンフロープラズマ領域であるにもかかわらず、 10^{11} cm^{-3} オーダの高密度なプラズマが得られた。次に、8インチウェーハ上のフォトレジストのアッシング性能を調べた。ウェーハ温度を250 とし、 O_2 ガス流量1,000 sccm^(注4),圧力70 Pa,マイクロ波出力1kWの条件で、平均アッシング性能は約4,000 nm/min,均一性は約7%が得られた。また、チャージアップダメージについても経時絶縁破壊(TDDB: Time Dependent Dielectric Breakdown)評価を実施したが、プラズマとウェーハの距離

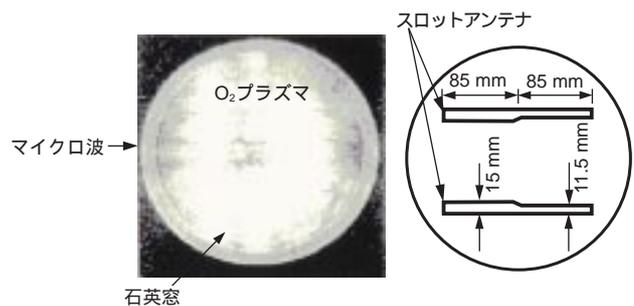


図3. スロットアンテナによるプラズマの生成 最適化したアンテナにより表面波が伝播され、 O_2 プラズマが均一に生成される。
 Plasma generation using slot-antenna

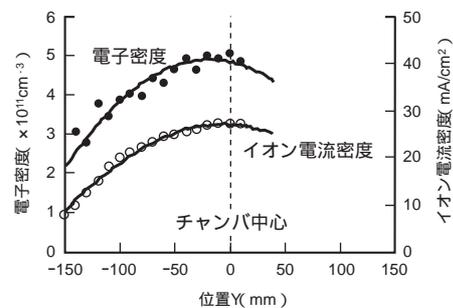


図4. 電子密度とイオン飽和電流 スロットアンテナは、 10^{11} cm^{-3} 台の高密度プラズマである(石英窓から95 mm下で測定)。
 Electron density and ion saturation current

を110 mm以上離すことでダメージのないプロセスが実現できた⁽¹²⁾。この装置は、配線幅が0.175 μm以下のDRAMプロセスなどのアッシング用プラズマ源としても実用化されている。更に、このスロットアンテナプラズマ源を次世代の12インチウェーハ用に最適化し、他社に先駆けてアッシング装置を実用化した⁽¹³⁾。

2.2 液晶プロセスへの応用

液晶用ドライプロセスでは、基板サイズに対応した大型のプラズマ源が必要となる。これに対して、図5に示すようにスロットアンテナを平行に配置した。スロットアンテナの位置、幅はマイクロ波の電界強度シミュレーションや、実験によって最適化した。例えば、400 mm×500 mmサイズの基板では、アンテナ長を400 mm、幅を導波管内波長の半波長ごとの5段階に変化させ、アンテナを2組平行に並べた構成とした⁽⁸⁾。このプラズマ源は、ポリシリコン(p-Si)窒化シリコン(SiN)のエッチングやアッシングプロセスに採用されている。エッチングの例として、プロセス条件をO₂/CF₄^(注5) = 300/200 sccm、圧力 = 30 Pa、マイクロ波パワー4 kW(2 kW×2)の条件としたときのSiNの形状を図6に示す。エッチングレート = 900 nm/min、均一性 = ± 15%、テーパ角 = 1.22 radを実現している。

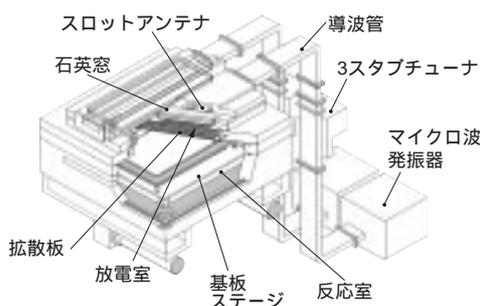


図5 . 液晶用スロットアンテナプラズマ源 400×500 mm²サイズの液晶基板に対応するため、スロットアンテナを二つ並べている。
Slot-antenna plasma source for TFT-LCD substrate

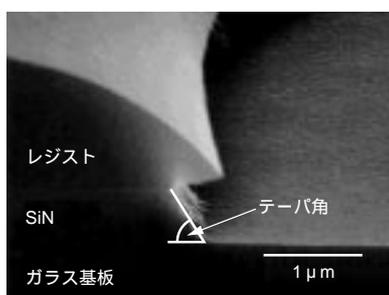


図6 . SiNのエッチング形状 図4の液晶用スロットアンテナプラズマ源により、所望の形状が得られる。
Etching profile of SiN

(注5) 四フッ化炭素(tetra-fluorocarbon)

更に、プラズマの大面積化に対応するために、スロットアンテナに平行に配置した送受信アンテナにマイクロ波を伝播させ、表面波プラズマを励起する金属線路プラズマ源⁽¹⁴⁾や伝送損失を表面波の1/2にできるTEM(Transverse Electro-Magnetic wave)モードプラズマ源などの開発も進めている。

3 アンテナ内挿型 ICP

ICPIは、コイル状のアンテナとそれをプラズマから絶縁する誘電体からなるプラズマ源で、アンテナに流れるRF電流により磁界を発生させる。RF磁界は、電磁誘導により誘導電界を発生させ、これによりプラズマが生成、維持される。通常、ICPのアンテナは図7(a)のように誘電体窓を介して、真空容器の外に置かれている。このような装置でプラズマを大口径化するには、大面積で大気圧に耐えうる十分な厚みの誘電体窓が必要である。しかし、アンテナとプラズマの距離が離れ、プラズマ中の誘導電界を弱めるという問題が生ずる。これに対し、図7(b)のように真空容器内部にアンテナを直接挿入した、アンテナ内挿型ICPを開発した。このICPでは、小さなアンテナ電流でも大きなパワーをプラズマに与えることができる。そのため、同じ入力パワーでもアンテナ電流が低くなるので、抵抗でのジュール損失が低下し、パワー伝送効率が向上する。パワー伝送効率(η)は、式(2)で与えられる。

$$\eta = (P_{in} - P_{loss}) / P_{in} \quad (2)$$

P_{in} : 入力(W), P_{loss} : アンテナでのジュール損失(W)

実際に、同一形状のアンテナを用いて、外部アンテナ型とアンテナ内挿型を比較したところ、アンテナ内挿型では2倍程度効率が良いことが確認され、低圧力、低パワーの条件でも10¹¹ cm⁻³オーダーの高密度プラズマが得られた⁽⁹⁾。

しかし、このプラズマ源は、大きな誘導電界をプラズマ中に発生させることができるが、アンテナ周りの誘電体がエッチングされるという問題が生ずる。これは、通常のICPでも放電途中で割れてしまう恐れがあり問題とされている。これを抑制するために、アンテナ配線間にコンデンサを直列に挿入し、アンテナ電圧を低下させる方式を考案した。アンテナのインダクタンスに発生する電圧に対して、コンデンサには逆相の電圧が発生するので、コンデンサの容量を最適化すれば、アンテナに発生する電圧を最小にすることができる。結果として、アンテナのセルフバイアス電圧を低下させ、アンテナ周りの誘電体の削れを1/10以下に抑制することができた。更に、アンテナ周りの誘電体をエッチングするというパワーの浪費も同時に低減されたため、電子密度が高くなる効果も確認された。プロセス条件をO₂ = 1,000 sccm、圧力 = 22 Pa、RFパワー = 1.5 kW、基板温度 = 250 °C とし、8インチウェーハを用いてアッシングレートを確認した結果、アッシングレート = 4,800 nm/min、均一性 = ± 4.2%と実用化されている装置と

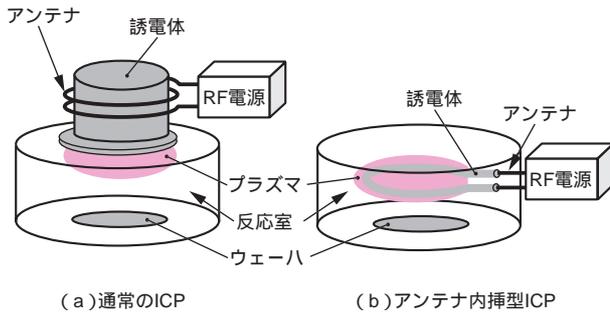


図7 .ICPの概要 通常のICPに比べて、アンテナ内挿型ICPでは、パワー伝送効率が良い。
Schematic diagram of ICP source apparatus

同等のレート、均一性が得られた。

大口径の基板に対応できるアンテナ内挿型ICPを図8に示す。アンテナは直線型であり、アンテナの本数を増やすことで大口径化が可能である。更に、アンテナ間にコンデンサを直列挿入し、アンテナ周りの誘電体の削れを抑制するとともに、アンテナに同じ電圧を発生させることができるため、プラズマの均一性も向上できた。

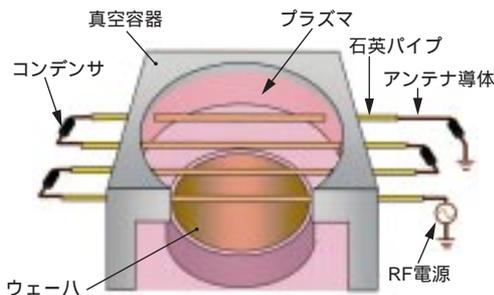


図8 .大型基板対応アンテナ内挿型ICPの概略構造 直線型のアンテナを増やすことで、大型基板に対応できる。
Schematic diagram of inner-antenna ICP source apparatus

4 あとがき

高密度プラズマの生成とその制御技術は、デバイスの微細化、大型化に伴い、今後ますます重要な技術となる。当社は、プラズマ振動プローブ、プラズマ吸収プローブ、バイアス光プローブ¹⁵⁾などの新たなプラズマ診断技術を用いて、更に効率的で質の高い、新たなプラズマ源開発を進めている。しかし、基板表面の反応制御、反応室内壁とプラズマとの相互作用の制御¹⁶⁾など解決すべき課題は多い。プラズマ診断だけではなく、反応室内のガス流れ¹⁷⁾、プラズマシミュレーション¹⁸⁾、TCAD(Technology CAD :デバイスシミュレータ/プロセスシミュレータ)などを駆使して、プラズマ源とプロセス、装置の関係をより明確にしていく。そして、反応チャンバやプロセス

の予測技術を確認し、プロセスの微細化や基板の大型化に対応していく所存である。

文献

- (1) 菅井秀郎 . 低圧力・高密度プラズマの新しい展開 . 応用物理 . 63 , 1994 , p.559 - 567.
- (2) 堀 勝 ,他 . 高密度プラズマとエッチング・薄膜形成への応用 . 応用物理 . 68 , 11 , 1999 , p.1252 - 1257.
- (3) F. F. Chen. Experiments on helicon plasma sources. J.Vac.Sci.Technol. A10, 1992, p.1389.
- (4) J.H.Keller. Inductive plasmas for plasma processing. Plasma Sources Sci. Technol. 5, 1996, p.166.
- (5) Nagatsu, M., et al. Optical Emission and Microwave Field Intensity Measurements in Surface Wave-Excited Planar Plasma. Jpn.J.Appl.Phys. 35, 1996, L341.
- (6) Komachi, K. ; Kobayashi, S. GENERATION OF A MICROWAVE PLASMA USING TRAVELING WAVES. J.Microwave. Power, 25, 1990, p.296.
- (7) Furuya, M., et al. Plasma Ashing using Microwave via slot antenna for 300 mm wafers. The Int. Society for Optical Engineering. 1999, p.239 - 246.
- (8) Takagi, S., et al. A Large Plasma Source Using a Slotted Antenna For The TFT-LCD Manufacturing Process. 1998 IEEE International Conference on Plasma Science, 1998, p.145.
- (9) Suzuki, K., et al. Power transfer efficiency and mode jump in inductive RF discharge. Plasma Sources Sci. Technol. 7, 1998, p.13.
- (10) USP. No. 5955382.
- (11) 加納正明, 他 . マイクロ波励起プラズマとスロットアンテナ形状の関係 . 第43回応用物理学関係連合講演会 . 1996, p.553.
- (12) 青木克明, 他 . ダウンフロープラズマのダメージ評価 . 第60回応用物理学学会学術講演会 . 1999, p.826.
- (13) 瀬川博之, 他 . 300mm アッシャー用スロットアンテナプラズマ . 第59回応用物理学学会学術講演会 . 1998, p.93.
- (14) Yamauchi, T., et al. Diagnostics of Large-area Plasma Produced by Surface Waves on a Metal Wall with Periodicity. AVS 46th Int. Sympo. 1999, p.92.
- (15) Sugai, H., et al. A biased optical probe method for measurements of electron energy distribution in a plasma. Plasma Sources Sci. Technol. 4, 1995, p.366.
- (16) 中村圭二, 他 . 高密度フロンプラズマにおける膜堆積とラジカル組成 . 第60回応用物理学学会学術講演会 . 1999, p.830.
- (17) 山崎 修, 他 . DSMC法によるアッシングシミュレーション 圧力依存性 . 第59回応用物理学学会学術講演会, 1998, p.805.
- (18) 井柳 克, 他 . PIMCSによるCF₄プラズマシミュレーション . 第60回応用物理学学会学術講演会 . 1999, p.830.



青木 克明 AOKI Katsuaki

生産技術センター プロセス研究センター 研究主務、技術士(機械部門)。半導体・液晶のエッチングプロセス及びプラズマ要素開発に従事。応用物理学学会会員。

Process Research Center



鈴木 啓之 SUZUKI Hiroyuki, D.Eng.

生産技術センター プロセス研究センター、工博。半導体・液晶のプラズマ要素開発に従事。電気学会、応用物理学学会会員。

Process Research Center



山内 健資 YAMAUCHI Takeshi

生産技術センター プロセス研究センター 研究主務。半導体・液晶のエッチングプロセス及びプラズマ要素開発に従事。応用物理学学会会員。

Process Research Center