エッチングガスの1 MHz 平板放電： CF_4 と SF_6 *

小林 秀彦**・楠 秀樹**・石川稜威男**

永関 一也**・斉藤 幸典**・菅ノ又伸治**

(受理1993年11月26日, 掲載決定1994年1月8日)

1 MHz Parallel-Plate Discharges in Etching Gases: CF_4 and SF_6 Hidehiko KOBAYASHI, Hideki KUSUNOKI, Itsuo ISHIKAWA,
Kazuya NAGASEKI, Yukinori SAITO and Shinji SUGANOMATA

(Faculty of Engineering, Yamanashi University, Takeda 4-3-11, Kofu, 400)

(Received November 26, 1993, Accepted January 8, 1994)

1. 緒 言

半導体製造工程におけるドライエッチングプロセスに放電プラズマが応用されている。このような場合に利用されるガスはハロゲン元素を含む分子状の電気的負性ガスであり、その放電の特性はまだ十分に明らかにされていない。本報では、負性度の異なる CF_4 ガスと SF_6 ガスについて放電特性を比較検討した結果について報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の構成図を Fig. 1 に示す。放電容器等の主要な装置は前報¹⁾とほぼ同様である。電極は直径8 cm, 電極間隔が2 cmの平行平板型である。接地電極(図中右側電極)前面にはアルミニウムウェーハが電気的に浮遊するように取り付けてある。今回報告する圧力66.5 Paの放電ではその直流浮遊電位は大きくても+30 V程度であり、放電構造に与える影響は観測されなかった。電極間中央には測定系全体を電気的に浮遊させたダブルプローブ(白金線直径0.1 mm, 長さ5 mm, 間隔6 mm)が挿入してあり、白金線二本を含む平面は電極に対して平行に設置した。測定したプローブ特性からボル

ツマン分布を仮定して電子温度を算出した。ただし、 SF_6 ガス100%の場合のように n_-/n_+ (n_- : 負イオン密度, n_+ : 正イオン密度) が1に近い場合には負イオンの影響が無視できなくなるが²⁾, 今回はその補正を行っていないので電子温度が比較的高く評価される傾向にある。光学的測定は前報¹⁾とは異なり、ミラーと分光器と光電子増倍管(PMT)から成る測定系を用いて発光スペクトル線強度の時間空間変化を調べられるようにした。ガスの混合は二系統の供給管を用いてニードルバル

Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement. FG: function generator, DSO: digital storage oscilloscope, M: mirror, PC: personal computer.

* 平成5年10月29日 第34回真空に関する連合講演会で講演

** 山梨大学工学部 (〒400 甲府市武田4-3-11)

ブを調整して流量を変えて行った。

3. 実験結果と考察

ガス圧力66.5 Paにおいて、電力1 Wの放電を維持しているときの印加電圧（放電維持電圧）と放電電流波形をFig. 2に示す。Jの位置で電流を測定すると、励振電

Fig. 2 Waveforms of applied voltage and discharge current, Pressure $P=66.5$ Pa, frequency $f=1$ MHz, power $P_e=1$ W. (a) N_2 gas, (b) CF_4 gas, (c) SF_6 gas.

極と接地容器を流れる電流が含まれ、容量性の成分が多い。本報で述べる圧力では放電は電極間で起こっている。この状況を知るために放電電流はFig. 1のIの位置で測定した。 N_2 ガス放電の場合 (Fig. 2(a))、電圧に対する電流の位相の進みは約76度であり放電空間のインピーダンスは容量性になっている。 CF_4 ガス放電では電流の進みは約71度であり (Fig. 2(b))、放電空間は負性のない N_2 ガスと同様に容量性である。一方、 SF_6 ガス放電では電流の進みは約30度と小さく (Fig. 2(c))、放電空間は抵抗性である。この場合の放電維持電圧は N_2 ガスが最も大きく、 CF_4 ガス、 SF_6 ガスの順で小さくなる。 CF_4 ガス放電では実効電離係数 $\bar{\alpha}$ が N_2 ガスに比べて大きく、弱い電界に対しても電離が進展しやすいことが知られており、 N_2 ガスに比べて放電維持電圧が低くなる。一方、 SF_6 ガスは絶縁ガスとして用いられており、直流放電や低周波放電では絶縁耐圧が高いということが知られているが、1 MHz 放電では周波数特性⁹⁾が現れるために N_2 ガス放電の場合よりも維持電圧が低くなっている。

CF_4 ガス及び SF_6 ガスに負性のない N_2 ガスを混合して負性度を変えて放電維持電圧の変化を調べた。その結果をFig. 3に示す。ここで、縦軸には放電維持電圧のピーク・ツー・ピークの1/2の電圧 V_p を示す。横軸の右側が負性ガス (CF_4 または SF_6) 100%，左側が N_2 ガス100%の場合である。 SF_6 - N_2 混合ガス放電では SF_6 ガスをわずか5%混合するだけで維持電圧は SF_6 ガス100%の場合とほぼ同様となり、混合比によらず維持電

Fig. 3 Discharge-sustaining voltage vs gas mixing ratio. Total pressure $P=66.5$ Pa, $P_e=1$ W. SF_6+N_2 (■). CF_4+N_2 (□).

圧はあまり変化しない。このとき放電空間は抵抗性である。SF₆ガスはわずか5%をN₂に混合するだけで放電構造が変化して、SF₆ガス放電の場合と同様になるのは電子付着係数 η が大きいためと考えられる。一方、CF₄-N₂混合ガスの場合には混合によるこのような変化は観測されない。CF₄にN₂ガスを5~10%程度混合すると維持電圧がCF₄ガス100%の放電に比べて低下し極小値をとり、混合比が50%程度になるとN₂ガス100%の場合とはほぼ同様となるようなV字特性が得られた。このとき混合比によって、放電空間の等価容量はあまり変化しないが、等価抵抗はN₂ガスの5~10%の混合で最大となり、電流進み角は約56度になった。このことはCF₄ガスにN₂を少量混合した場合に負性の効果が現れ易いと考えられる。このような一種の相乗効果はSF₆-N₂混合ガスではみられなかった。CF₄-N₂混合ガスのスウォームパラメータの解析⁹⁾によれば、N₂5%程度の混合で電界の弱いときに負性が現れ易い傾向がみられる。

ガスによって放電プラズマ中の電子温度がどのように変わるかを調べた結果をFig. 4に示す。SF₆-N₂混合ガス放電の場合、負性のないN₂ガス放電の場合に比べて電子温度は高くなる傾向にあり、電力による変化はあまりみられない。負性度が増すに従って電子温度が高くなる典型的な負性ガス放電の特徴がみられる。一方、CF₄ガス放電ではN₂ガス放電の場合に比べて電子温度が低くなる傾向にある。また電力を下げていくと電子温度が高くなる。SF₆ガス放電では電子付着によって負イオンを生じ、少ない電子で放電を維持するので電子温度が

N₂ガス放電の場合に比べて高くなる。一方、CF₄ガス放電では負イオンも存在する⁵⁾が n_-/n_e (n_e :電子密度)は1の程度で、実効電離係数 $\bar{\alpha}$ はN₂ガスよりも大きく、電離が進展しやすいために、電子温度はN₂ガス放電の場合に比べて低くなると考えられる。SF₆ガスの場合には、電力を大きくすると電流は増加するが放電維持電圧があまり変化しないことから電子密度は増加するがそれとともに負イオン密度も増加すると考えられ、また電子のエネルギーが解離反応に消費されること³⁾、などによって電子温度の電力による依存性ははっきりとは観測されないと考えられる。N₂ガス放電では、電力の増加とともに電離が進み電流が増加するが、陰極降下部にかかる電圧も増加するので、電子温度の電力による変化はみられないと思われる。一方、CF₄ガス放電の場合には、電力を下げていくと電子数は減少するが、相対的な負イオン密度が増加するために負性の影響が現れ電子温度が高くなると考えられる。同じ電力で比較した場合、CF₄ガスに5%N₂ガスを混合するとCF₄ガス放電よりも放電空間のインピーダンスは抵抗性になり、これは負性の現れであると考えられる。負性が強くなるほど電子温度は高くなる傾向にあるので、CF₄ガスに5%N₂ガスを混合するとCF₄ガス放電よりもより高電力側で電子温度が高くなると考えられる。

放電構造を知る一つの方法として発光スペクトル線強度の時間空間変化を測定し、負イオンの存在する効果が現れるかどうかを調べた。Fig. 5にCF₄ガスに50%N₂ガスを混合した場合のN₂ 337.1 nmのスペクトル線強度

Fig. 4 Power dependence of electron temperature, $P=66.5$ Pa, $f=1$ MHz. SF₆(●), N₂(◆), CF₄(○), SF₆ 10%+N₂ 90%(■), SF₆ 5%+N₂ 95%(▲), CF₄ 95%+N₂ 5%(□).

Fig. 5 Spatiotemporal emission profile of N₂ 337.1 nm line in CF₄/N₂ mixture discharge with N₂ of 50%. $P=66.5$ Pa, $P_e=1$ W.

の時間空間変化を示す。この結果によると印加電圧が0となる位相 ($\omega t=0, \pi$) で発光が強く観測されている。また印加電圧が最大となる位相 ($\omega t=\pi/2, 3\pi/2$) で負グローとは異なる位置 (瞬時陽極前面) にも発光が観測される。 N_2 ガス放電ではこれらのような負グロー以外の発光は観測されないが、これと同様の発光は SF_6 ガス放電で観測されており⁶⁾、これらの発光は負イオンの存在する影響によって生ずる空間電荷効果に基づくと考えられる。

4. 結 言

電氣的負性ガス SF_6 及び CF_4 についてその放電の特性を調べ、負性のない N_2 ガスと比較した結果、以下のことがわかった。放電維持電圧や電子温度の測定結果には、 SF_6 ガス放電では電氣的負性の効果が現れるが、 CF_4 ガス放電では負性の効果は強くはみられず、むしろ負性のない N_2 ガスに似た傾向を示す。しかしながら、発光の時間空間変化には CF_4 ガス放電でも負性の強い

SF_6 ガス放電の場合と同様な様相が観測され放電構造には負性の影響が現れることがわかった。

最後に、 CF_4 - N_2 混合ガスのスウォームパラメタ解析結果を御教示下さった室蘭工業大学の伊藤秀範先生に感謝いたします。また、本実験に協力していただいた会田健二、斎藤健司、松原義憲、佐藤和則の各氏に感謝します。

〔文 献〕

- 1) 小林, 石川, 永関, 菅ノ又: 真空, **36** (1993) 299.
- 2) H. Amemiya: J. Phys. D: Appl. Phys. **23** (1990) 999.
- 3) 石川, 菅ノ又, 雨宮, 秋津, 斉藤: 真空, **35** (1992) 356.
- 4) 伊藤, 猪股: 私信, 1993年9月.
- 5) J. L. Jauberteau, G. J. Meeusen, M. Haverlag, G. M. W. Kroesen and F. J. de Hoog: Appl. Phys. Lett. **55** (1989) 2597.
- 6) I. Ishikawa, T. Amamiya and S. Suganomata: Jpn. J. Appl. Phys. **31** (1992) 4037.