C₄F₈/Ar/O₂ および C₄F₈/SF₆/O₂ 混合ガスにおける 13.56 MHz 放電中のイオン種

廣瀬 友嗣*・石川稜威男*・永関 一也*²
齊藤 幸典*・菅ノ又伸治*

(受理1998年5月6日, 掲載決定1998年8月1日)

Ionic Species in 13.56 MHz Discharges in C₄F₈/Ar/O₂ and C₄F₈/SF₆/O₂ Mixtures

Yuji HIROSE*, Itsuo ISHIKAWA*, Kazuya NAGASEKI*²,
Yukinori SAITO* and Shinji SUGANOMATA*

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

*²(Tokyo Electron Yamanashi Ltd., Fujii-machi, Nirasaki, 407-01)

(Received May 6, 1998, Accepted August 1, 1998)

Discharge plasmas of C₄F₈/Ar/O₂ and C₄F₈/SF₆/O₂ mixtures were investigated in ionic species at a frequency of 13.56 MHz, a power of 34 W, and a pressure of 6.65 Pa (50 mTorr) or 13.3 Pa (100 mTorr). The discharge sustaining voltages in both mixtures are scarcely influenced by varying the mixing ratio of C₄F₈ or O₂ on the order of 10% around C₄F₈ 10%/Ar 80%/O₂ 10% and C₄F₈ 10%/SF₆ 80%/O₂ 10%, respectively. Intensity ratios of some ionic species, however, change according to the mixing ratio of C₄F₈ or O₂. From the intensity variation of O₂⁺, O₂⁺ and O₂ are considered to be consumed by reactions with dissociation products of C₄F₈. In the discharge in C₄F₈/Ar/O₂, intensity ratios of major positive ions are almost the same as those in discharge at large Ar mixing ratio in C₄F₈/Ar. In the discharge in C₄F₈/SF₆/O₂, a major negative ion is F⁻, and a small number of CF₃⁻ is observed. CF₃⁻ seems to originate from C₄F₈, because its intensity increases according to the mixing ratio of C₄F₈. Furthermore, COF₃⁻ and C₂OF₅⁻ are also observed.

1. 結 言

半導体集積回路の製造時のエッチング工程において C₄F₈/Ar/O₂ 混合ガスの高周波放電プラズマが利用されている。最近, C₄F₈ ガスとその混合ガスの放電プラズマについては研究が進められており¹⁻⁷⁾, 我々もこれまで C₄F₈ ガス⁸⁾ と C₄F₈/Ar および C₄F₈/O₂ 混合ガス⁹⁾ の 13.56 MHz 放電の特性や正イオン種, あるいは C₄F₈ ガス¹⁰⁾ と C₄F₈/O₂ 混合ガス^{10,11)} の 1 MHz 放電における電氣的特性や発光の時空変化について報告した。しかし,

C₄F₈/Ar/O₂ 混合ガス放電の正イオン種や負イオン種に関する研究は殆どない。そこで, 本研究では C₄F₈/Ar/O₂ 混合ガス放電の特性と放電プラズマ中の正イオン種を調べた。また, C₄F₈/SF₆/O₂ 混合ガス放電については正・負イオン種を四重極質量分析器を用いて測定した。SF₆ ガスを混合したのは負イオンの測定を実施しやすくするため¹²⁾, 詳細は後で述べる。本報ではこれらの混合ガス放電の特性についてイオン種の混合比による変化を中心にして報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の構成を Fig. 1 に示す。放電容器などの装置の構成は前報^{12,13)} とほぼ同じである。放電容器はアル

* 山梨大学工学部 (〒400 甲府市武田 4-3-11)

*² 東京エレクトロン山梨 (〒407-01 韮崎市藤井町)

Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement.

ミニウム製の電極を取り付けた2枚のアルミナセラミック円盤と内径29 cmの石英円筒で構成されている（容積約2.7 l）。電極の直径は15 cm，電極間隔（ d ）は2.5 cmのほぼ対称な平行平板型である。C₄F₈，Ar，O₂およびSF₆ガスはそれぞれのガス流量（ Q ）を調節して混合比（流量比）を調節し，上部励振電極に設けた多数の孔からシャワー状に導入した。排気は接地電極横の排気孔から行った。放電容器内の圧力（ P ）は放電容器とターボ分子ポンプの間に設けたバタフライ式のコンダクタンスバルブを用いてガス流量とは独立に調節した。圧力の測定にはキャパシタンスマノメータを用いた。電力 P_e はRF電源から自動整合器を通して上部励振電極に供給し，下部電極は接地した。正イオン種の測定は上部励振電極と先端に直径0.1 mmのオリフィスを持つSampling tipを直流的に浮遊させた状態で行い^{8,9)}，負イオン種の測定は上部励振電極にLow Pass Filter (LPF)を通して直流バイアス電圧（ $V_b=120$ V）を印加し，Sampling tipには直流バイアス電圧（ $\langle V_{tip} \rangle=65\sim 80$ V）を印加して行った^{12,13)}。放電空間中のイオン種はプラズマ電位とSampling tipの電位の電位差で四重極質量分析器（QMS）系に取り込まれる。QMSは静電偏向型のイオンエネルギーアナライザーを内蔵しており，抽出したイオンのエネルギーを測定することができる。放電容器内の圧力を $P=13.3$ Pa（100 mTorr）としたときの

QMS内部の圧力は0.2 mPaであり，装置長はイオン-分子間の平均自由行程（数百 [m]）よりも十分に短い。

C₄F₈ガス放電では，C₃F₈のポリマー膜が放電容器の内壁，電極やサンプリングチップなどの表面に形成される⁸⁾。そのため実験の前には放電容器内の膜を除去するために $P=10.0$ Pa（75 mTorr）， $Q=5$ sccm， $P_e=34$ WでO₂ 20%/Ar 80%放電を1時間行った。C₄F₈/Ar/O₂混合ガス放電の実験は $P=6.65$ Pa（50 mTorr）， $Q=20$ sccmおよび $P_e=34$ Wを固定して混合比を変えて行い，C₄F₈/SF₆/O₂混合ガス放電では $P=13.3$ Pa（100 mTorr）， $Q=20$ sccmおよび $P_e=34$ Wを固定して混合比を変えて行った。

3. 実験結果および考察

3.1 C₄F₈/Ar/O₂混合ガス放電の特性と正イオン種

実際のエッチングプロセスに用いられている混合比はC₄F₈ 10%/Ar 85%/O₂ 5%付近である。そこで，その混合比付近でC₄F₈ガスまたはO₂ガスの流量を固定して他のガスの流量を変えてその放電の特性と正イオン種を調べた。先ずO₂ガスの作用を調べる目的で，C₄F₈ガスの流量を2 sccmに固定して全ガス流量を20 sccmとなるようにO₂ガスとArガスの流量を変えて実験を行った。このときの励振電極に印加した電圧の波高値，放電維持電圧（ V_{rf} ）はO₂ガスの混合比5%から15%に変えても約290 Vで殆ど変わらない。 $P=6.65$ Pa， $Q=5\sim 20$ sccmおよび $P_e=34$ Wでの各種混合ガスの放電維持電圧（ V_{rf} ）をTable 1に示す。混合比C₄F₈ 10%/Ar 80%/O₂ 10%の V_{rf} は，ArガスやC₄F₈ 20%/Ar 80%およびAr 80%/O₂ 20%混合ガスの値に近い値である。強度の強い正イオンのエネルギー分布を示したものがFig. 2である。混合比（流量比）C₄F₈ 10%/Ar 85%/O₂ 5%の結果である。縦軸のrelative intensityとは信号強度の最も大きいイオンの最大値で規格化した相対強度を表している。また各イオンのエネルギー分布は信号強度が0となる位置をずらして示した。横軸のpotentialとは，RF電界のない静電界において放電空間中のイオンが無衝突で抽出された場合，接地電位を基準としてイオンが放電空間中のどのような電位の位置から出発したかを示す値であり，即ちイオン検出のオリフィスに入ったイオンが出発した

Table 1 Discharge sustaining voltages (V_{rf}) in various gases of $P=6.65$ Pa, $Q=5\sim 20$ sccm and $P_e=34$ W.

Gas	Ar	Ar80%/O ₂ 20%	C ₄ F ₈ 20%/Ar80%	C ₄ F ₈ 10%/Ar80%/O ₂ 10%
Q (sccm)	5	5	5	20
V_{rf} (V)	280	270	270	290

Fig. 2 Typical examples of the energy distributions for positive ions extracted from $C_4F_8/Ar/O_2$ discharge space.

場所の空間電位を表す。従ってイオンは、Sampling tip 前面に形成されるシース中で衝突の影響を受けるとプラズマ電位よりも低エネルギーに分布する傾向を示し、RF 電界の影響を受けるとやや広がったエネルギー分布となり場合によっては2つのピークが現れる¹⁴⁾。この混合ガスの主な正イオン種は Ar^+ ($M/e=40$) と CF^+ ($M/e=31$) である。これらのイオン種の他に、 $C_2F_4^+$ ($M/e=100$)、 CF_3^+ ($M/e=69$)、 CF_2^+ ($M/e=50$)、 O_2^+ ($M/e=32$)、 COF^+ ($M/e=47$) および CO^+ ($M/e=28$) などが観測された。信号強度の大きい Ar^+ と CF_x^+ ($x=1-3$) のエネルギー分布の平均値 ($\langle E \rangle$) から求めた時平均のプラズマ電位 ($\langle V_p \rangle$) は約48 V である。図には示していないが信号強度の弱い O_2^+ と CO^+ の $\langle E \rangle$ もその値に近い。しかし、信号強度が弱い $C_2F_4^+$ の $\langle E \rangle$ は約59 V とそれらのイオン種の $\langle E \rangle$ よりも約10 V 高くなる。電位が高い部分の Ar^+ 、 CF_x^+ ($x=1-3$)、 O_2^+ および CO^+ はシース部で衝突して信号強度が低くなるために $\langle E \rangle$ が低くなると考えられる。従って信号強度の大きいイオンの $\langle E \rangle$ から求めた $\langle V_p \rangle$ は、約10 V 低く見積もる可能性があると考えられる。このような傾向は混合比 C_4F_8 10%/Ar 80%/O₂ 10%、 C_4F_8 10%/Ar 75%/O₂ 15%、 C_4F_8 5%/Ar 85%/O₂ 10% および C_4F_8 15%/Ar 75%/O₂ 10% の結果でも見られた。

O_2 ガス混合比に対する正イオン種の信号強度比の変

Fig. 3 Ion count ratios of positive ions in $C_4F_8/Ar/O_2$ discharge as a function of O_2 mixing ratio.

化を Fig. 3(a) と (b) に示す。縦軸は各イオンのエネルギー分布の信号強度の積分値をそれら全体の合計で規格化した信号強度比である。 Ar^+ と C_4F_8 の解離種のイオン $C_xF_x^+$ の信号強度比は O_2 ガスの混合比によらずほぼ一定であり、 C_xF_x の正イオンの中では CF^+ の割合が一番大きい。これらの信号強度比は C_4F_8/Ar 混合ガス放電の Ar ガスの混合比が大きい条件での結果⁹⁾ とほぼ同じであり、 CF_x^+ ($x=1-3$) の生成には親ガスの解離性電離と解離種の電離に加えて、 C_xF_x のポリマー膜から放出された分子²⁾ の電離も寄与しているものと考えられる。また C_xF_x の正イオンの中で CF^+ の割合が一番大きくなるが、 Ar^+ の強度がその流量比から予測される値よりも低くなることを考慮すると、 Ar^+ や準安定原子 $Ar^*(M)$ と解離種との反応などが考えられる⁹⁾。 O_2^+ の

信号強度比は O_2 ガスの混合比を小さくすると急に小さくなる。 CO^+ と COF^+ の信号強度比は O_2 ガス混合比の減少よりも緩やかに減少する。これらの結果から O_2 ガスの混合比が小さな条件では、 C_4F_8 の解離種と反応して消費される O_2 と O_2^+ の割合が大きくなると考えられる。

次に C_4F_8 ガスの作用を調べる目的で、 O_2 ガスの流量を 2 sccm に固定して全ガス流量を 20 sccm となるように C_4F_8 ガスと Ar ガスの流量を変えて実験を行った。 V_f は C_4F_8 ガスの混合比を 5% から 15% と変えても約 280~290 V と殆ど変わらない。また、強度の強い正イオン種のエネルギー分布から求めた $\langle V_p \rangle$ は約 40~50 V である。先に述べたようにこの $\langle V_p \rangle$ は約 10 V 程度低く見積もっている可能性があると考えられる。正イオン種の信号強度比の C_4F_8 ガス混合比に対する変化を Fig. 4 に示す。 C_4F_8 ガスの混合比を大きくする、即ち Ar ガスの混合比を小さくすると Ar^+ の信号強度比は混合比が低下する割合よりも小さくなる。 CF_3^+ の信号強度比は C_4F_8 ガスの混合比の増加割合にほぼ等しく、 $C_2F_4^+$ はやや大きくなる。 CF^+ の信号強度比の増加割合は他の $C_xF_x^+$ の正イオン種に比べて小さい。 O_2^+ の信号強度比は O_2 ガスの流量が一定であるにもかかわらず、 C_4F_8 ガスの混合比を大きくすると小さくなる。 CO^+ の信号強度比は C_4F_8 ガスの混合比を変えてもほぼ一定であり、 COF^+ はわずかに大きくなる。これらの結果から C_4F_8 ガスの混合比を大きくすると CF_x などの解離種の密度が増すこと、 Ar^+ 、準安定原子 $Ar^*(M)$ 、 O_2 および O_2^+ はそれらの解離種と反応して消費されることが考えられる。

3.2 $C_4F_8/SF_6/O_2$ 混合ガス放電の特性とイオン種

電氣的負性の強い SF_6 ガスのプラズマでは、プラズマ密度に対する電子密度の割合を十分に小さくすることができるので、プラズマ電位は低下し、負イオンが引き出される¹⁵⁾。励振電極に外部から直流バイアス電圧を印加してプラズマ電位を制御できれば負イオンの測定に有効である^{12,13)}。本研究においても同様な方法を用いた。まず、 C_4F_8 ガス放電で負イオンの測定を試みたが、負イオンは測定されなかった。この一因として C_xF_x のポリマー膜の帯電の影響が考えられる。次にこのような膜を少なくするために C_4F_8 ガスに O_2 ガスを 30% 混合して負イオンの測定を行ったが、負イオンは測定されなかった。この原因としてプラズマ電位が高いことと膜の影響が残ることなどが考えられる。次にプラズマ電位を下げるために C_4F_8 ガスに SF_6 ガスを混合して負イオンの測定を行ったが、負イオンは測定されなかった。この原因として膜の影響が残るプラズマ電位が低くならないこと

Fig. 4 Ion count ratios of positive ions in $C_4F_8/Ar/O_2$ discharge as a function of C_4F_8 mixing ratio.

が考えられる。そこでプラズマ電位を下げるために C_4F_8 ガスに SF_6 ガスを混合し、更に膜の付着を少なくするために C_4F_8 ガスに対する O_2 ガスの混合比を大きくした ($C_4F_8 : O_2 = 1 : 1$)。この方法で負イオンの測定が実現できた。即ち $C_4F_8/SF_6/O_2$ 混合ガス 13.56 MHz 放電では、圧力 13.3 Pa、ガス流量 20 sccm、供給電力を 34 W に固定して混合比を変えて放電特性と正および負イオン種を測定した。

V_f は混合比を変えても約 90 V と殆ど変わらない。 $P=10.0\sim 13.3$ Pa、 $Q=5\sim 20$ sccm および $P_r=34$ W での各種混合ガスの放電維持電圧 (V_f) を Table 2 に示す。混合比 C_4F_8 10%/ SF_6 80%/ O_2 10% の V_f は、 SF_6 ガスおよび SF_6 80%/ O_2 20% 混合ガスの値に近い値となる。 C_4F_8 ガスの V_f が SF_6 ガスの値に近い値となるのは

Table 2 Discharge sustaining voltages (V_d) in various gases of $P=10.0\text{--}13.3$ Pa, $Q=5\text{--}20$ sccm and $P_e=34$ W.

Gas	C_4F_8	SF_6	$SF_6 80\%/O_2 20\%$	$C_4F_8 10\%/SF_6 80\%/O_2 10\%$
P (Pa)	13.3	13.3	10.0	13.3
Q (sccm)	5	5	5	20
V_d (V)	100	110	110	90

同じく電氣的負性ガスで圧力に対する V_d の変化が似ているためと考えられる⁸⁾。またこの混合比 C_4F_8 10%/ SF_6 80%/ O_2 10% の V_d は、Table 1 で示した混合比 C_4F_8 10%/ Ar 80%/ O_2 10% の値 (約290 V) よりも低いのは、以下に述べるような Ar ガスと SF_6 ガスの圧力による V_d の変化の違いによると考えられる。圧力13.3 Pa は Ar ガス放電では V_d が最小となる圧力よりも左側であるが⁹⁾、 SF_6 ガス放電では V_d が最小となる圧力付近であり⁸⁾、その値は Ar ガス放電よりも低い。強度の強い正イオン種のエネルギー分布から求めた $\langle V_p \rangle$ は約10 V とほぼ一定である。この混合ガスではイオン種のエネルギー分布に衝突の影響はあまり認められなかった。ガス混合比に対する正イオン種の信号強度比の変化を Fig. 5(a) と (b) に示す。この混合ガスにおいては SF_6 ガスの混合比が大きいのので、主な正イオン種は SF_5^+ ($M/e=89$) である。これらのイオン種の他に、 SF_3^+ ($M/e=127$)、 SF_2^+ ($M/e=70$)、 $C_3F_3^+$ ($M/e=131$)、 $C_2F_4^+$ ($M/e=100$)、 CF_3^+ ($M/e=69$)、 O_2^+ ($M/e=32$)、 SOF_3^+ ($M/e=105$)、 SOF^+ ($M/e=67$)、 CO^+ ($M/e=28$) および $M/e=91$ などが観測された。 SF_5^+ 、 SF_3^+ および同位体である ^{34}S を含んだ $^{34}SF_5^+$ ($M/e=91$) の信号強度比はほぼ SF_6 ガスの混合比に比例して変化する。 SF_2^+ の信号強度比は混合比に依らずほぼ一定である。 $C_3F_3^+$ 、 $C_2F_4^+$ および CF_3^+ の信号強度比はほぼ C_4F_8 ガスの混合比に比例して変化する。 $C_3F_3^+$ の正イオンの中では CF_3^+ の割合が一番大きい。 O_2^+ 信号強度比の増加割合は O_2 ガスの混合比の増加割合よりも小さい。 SOF^+ の信号強度比も O_2^+ と同様、 O_2 ガスの混合比が大きくなると大きくなる。 CO^+ の信号強度比は、 C_4F_8 ガスと O_2 ガスの混合比が大きくなると、急に大きくなる。 SOF_3^+ の信号強度比は混合比に依らずほぼ一定である。これらの結果から O_2^+ や O_2 が、 C_4F_8 ガスや SF_6 ガスの解離種と反応して消費されていると考えられる。

ガス混合比に対する負イオン種の信号強度比の変化を Fig. 6(a)~(c) に示す。混合比による信号強度比の変化からイオン種を分類すると $[SF_6^-$ ($M/e=146$)、 SF_5^- ($M/e=127$) と SF_4^- ($M/e=108$)], $[SOF_5^-$ ($M/e=143$) と SOF_3^- ($M/e=105$)], $[SO_2F_2^-$ ($M/e=102$)、 SO_3F^-

Fig. 5 Ion count ratios of positive ions in $C_4F_8/SF_6/O_2$ discharge as a function of gas mixing ratio.

($M/e=99$) と SO_2F^- ($M/e=83$)], $[M/e=135$ と $M/e=85]$ と、いずれにも属さない $M/e=123$, CF_3^- ($M/e=69$) および F^- ($M/e=19$) となる。この混合ガスにおけ

Fig. 6 Ion count ratios of negative ions in $C_4F_8/SF_6/O_2$ discharge as a function of gas mixing ratio.

る主な負イオン種である F^- の信号強度比は C_4F_8 ガスと O_2 ガスの混合比が大きくなると、即ち SF_6 ガスの混合比が減少すると小さくなる。信号強度は弱い C_2F_x の負イオン種として CF_3^- ($M/e=69$) が観測された。その信号強度は C_4F_8 ガスの混合比を増すと大きくなることから、 C_4F_8 の解離種によるものまたは解離性付着によるものと思われる。 SF_6^- 、 SF_5^- および SF_4^- の信号強度比は混合比に依らずほぼ一定である。 SOF_5^- 、 SOF_3^- 、 $SO_2F_2^-$ 、 SO_3F^- および SO_2F^- は放電生成物 SOF_4 、 SOF_2 および SO_2F_2 などから生成されたものと考えられる^{16,17)} が、 $SO_2F_2^-$ 、 SO_3F^- および SO_2F^- の信号強度比が SF_6 ガスと O_2 ガスの混合比の積から推定される変化よりも大きいことから O^- の付着により生成される可能性も考

えられる。 $M/e=135$ と $M/e=85$ のイオン種としてそれぞれ $SiCF_3^-$ ¹⁸⁾と SiF_3^- ¹⁹⁾とする報告もあるが、それらの信号強度比が C_4F_8 ガスと O_2 ガスの混合比の積にほぼ比例して増加することから、それぞれ $C_2OF_5^-$ と COF_3^- であることが考えられる。これらの負イオン種の信号強度比は CF_3^- よりも約1桁大きい。 $M/e=123$ は混合比に依存せずほぼ一定である。 $M/e=123$ の負イオンは SF_6 ガス放電でも観測されており¹³⁾、装置のリークや残留ガスの不純物などと反応して生成した $(H_2O)SOF_3^-$ であると考えられる。このように、信号強度は弱い C_2F_x の負イオン種として CF_3^- ($M/e=69$) が存在すること、 C_4F_8 ガスと O_2 ガスの反応生成物の負イオンとして $C_2OF_5^-$ と COF_3^- が存在する可能性があることがわかつ

た。

4. 結 言

$C_4F_8/Ar/O_2$ および $C_4F_8/SF_6/O_2$ 混合ガス13.56 MHz放電中のイオン種を混合比 C_4F_8 10%/Ar 80%/O₂ 10%と混合比 C_4F_8 10%/SF₆ 80%/O₂ 10%を中心に C_4F_8 や O₂ の混合比をそれぞれ10%程度変えて調べた。これらの混合ガスの放電維持電圧はガスの混合比を変えても余り変化しない。混合比 C_4F_8 10%/Ar 85%/O₂ 5%の Ar⁺ と解離種 C_xF_x の正イオンの信号強度比および放電維持電圧は C_4F_8/Ar 混合ガス放電の Ar ガスの混合比の大きい条件での結果とほぼ同じである。O₂ ガスの混合比を大きくすると O₂⁺ の信号強度比は混合比の増加割合よりも大きくなり、CO⁺ と COF⁺ は緩やかに大きくなる。従って O₂ ガスの混合比が小さな条件では O₂ や O₂⁺ が解離種との反応により消費される割合が増えるものと考えられる。一方、 C_4F_8 ガスの流量を大きくすると C_xF_x の正イオンの信号強度比は大きくなり、O₂ ガスの流量を固定しているにも関わらず O₂⁺ の信号強度比は小さくなる。従ってこの結果からも O₂ や O₂⁺ が解離種との反応により消費されていると考えられる。

$C_4F_8/SF_6/O_2$ 混合ガス放電における主な正イオン種は SF₃⁺ (M/e=89) であり、 C_xF_x のイオン種として C₃F₃⁺ (M/e=131)、C₂F₄⁺ (M/e=100) と CF₃⁺ (M/e=69) などが観測された。また、主な負イオン種は F⁻ であり、信号強度は弱い解離種 C_xF_x の負イオン種として CF₃⁻ が観測された。 C_4F_8 ガスと O₂ ガスの反応生成物の負イオンとして C₂OF₅⁻ と COF₃⁻ が存在し、それらの信号強度比は CF₃⁻ よりも約1桁大きいことがわかった。

〔文 献〕

- 1) K. Kubota, H. Matsumoto, H. Shindo, S. Shingubara and Y. Horiike: Jpn. J. Appl. Phys., **34** (1995) 2119.
- 2) K. Miyata, M. Hori and T. Goto: Jpn. J. Vac. Sci. Technol., **A14** (1996) 2083.
- 3) K. Siozawa, K. Tabaru, T. Maruyama, N. Fujiwara and M. Yoneda: Jpn. J. Appl. Phys., **35** (1996) 2483.
- 4) K. Kurihara and M. Sekine: Plasma Sources Sci. Technol., **5** (1996) 121.
- 5) H. Hayashi, K. Kurihara and M. Sekine: Jpn. J. Appl. Phys., **35** (1996) 2488.
- 6) H. Nogami, Y. Nakagawa, K. Mashimo, Y. Ogahara and T. Tsukada: Jpn. J. Appl. Phys., **35** (1996) 2477.
- 7) T. M. Miller, R. A. Morris, A. E. S. Miller, A. A. Viggiano and J. F. Paulson: Int. J. Mass Spectrom. Ion Processes, **135** (1994) 195.
- 8) S. Sasaki, Y. Hirose, I. Ishikawa, K. Nagaseki, Y. Saito and S. Suganomata: Jpn. J. Appl. Phys., **36** (1997) 5296.
- 9) Y. Hirose, S. Sasaki, I. Ishikawa, K. Nagaseki, Y. Saito and S. Suganomata: Jpn. J. Appl. Phys. to be submitted.
- 10) K. Aoyagi, I. Ishikawa, K. Nagaseki, Y. Hirose, Y. Saito and S. Suganomata: Jpn. J. Appl. Phys., **36** (1997) 5286.
- 11) Y. Hirose, K. Aoyagi, I. Ishikawa, Y. Saito and S. Suganomata: 真空, **41** (1998) 303.
- 12) S. Sasaki, I. Ishikawa, K. Nagaseki, Y. Saito and S. Suganomata: Jpn. J. Appl. Phys., **36** (1997) 847.
- 13) K. Nagaseki, I. Ishikawa, E. Nishimura, Y. Saito and S. Suganomata: Jpn. J. Appl. Phys., **34** (1995) L852.
- 14) I. Ishikawa, S. Sasaki, K. Nagaseki, Y. Saito and S. Suganomata: Jpn. J. Appl. Phys., **36** (1997) 4648.
- 15) I. Ishikawa, S. Iizuka, R. Hatakeyama and N. Sato: J. Phys. Soc. Jpn., **67** (1998) 158.
- 16) K. R. Ryan and I. C. Plumb: Plasma Chem. Plasma Process., **10** (1990) 207.
- 17) R. d. Agostino: J. Appl. Phys., **52** (1981) 162.
- 18) Y. Lin and L. J. Overzet: Appl. Phys. Lett., **62** (1993) 675.
- 19) I. Sauers, L. G. Christophorou and S. M. Spyrou: Plasma Chem. Plasma Process., **13** (1993) 17.