VHF 帯のホイッスラー波による 大直径プラズマ源の開発

准員 伊藤 彰 浩 (中部大)

非会員 加藤 法 之 (中部大)

正員 池 沢 俊治郎 (中部大)

非会員 貴 田 桂 介 (中部大)

Development of Large Diameter Plasma Source by Whistler Wave in the VHF Band

Akihiro Ito, Associate, Noriyuki Kato, Non-member Shunjiro Ikezawa, Member, Keisuke Kida, Non-member (Chubu University)

We have developed a large diameter plasma source by Whistler wave in the VHF band of frequency 144MHz. The experimental results have been obtained as follows: (1) The discharge mode could be explained by a Whistler mode. (2) The radial electron density distribution could be flat (2%), whose diameter was equal to that of helical coil of 60 cm ϕ . (3) The ion energy measured by a Faraday-cup decreased when the static magnetic field increased from resonant field. (4) The deposition of SiO₂ film was tried on a silicon wafer.

キーワード：ホイッスラー波, VHF 帯, 電子密度分布

1. ま え が き

CVD は、化学蒸着法あるいは化学気相成長とも呼ばれ、加熱した基板上に原料ガスを供給し、化学反応で生じた生成物を基板上に固体として堆積させて薄膜を形成する技術である。例えば、光ファイバや超電導体の製造、結晶成長にも広く応用されている。

そのうちプラズマ CVD 法は、プラズマ中に含まれるラジカルの化学的な活性を利用する。放電プラズマのような電子温度の高い非平衡プラズマでは、高い準位に励起されたラジカルが多数存在し、比較的低い基板温度でも CVD 反応が進行する。例えば、熱的な CVD では基板温度が 700°C 以上必要であったが、プラズマ CVD では 300°C 以下で得られる場合がある。プラズマ CVD で形成される薄膜としては、多層構造デバイスにおける層間の絶縁、あるいは外界からの保護を目的とした酸化シリコン、窒化シリコンの膜が多い。プラズマ CVD では、このような目的にかなう密

で均一な膜が容易に得られる。

低温プラズマ CVD 用高周波プラズマ源の放電に関する問題点としては次のようなことがあげられる。

(1) プラズマ生成モードの解明。

(2) 成膜種ラジカル (CH₃, SiH₃ など) の生成能力を高くするために、高エネルギーテールまたは高電子温度プラズマの必要性。

(3) 基板損傷のない高速良質成膜を行うために、イオンエネルギーとプラズマ電位が低くイオン密度の高いプラズマの必要性。

(4) デジタル成膜・デジタルエッチングを行うために 10⁻³ Torr 以下の低気圧の必要性などが挙げられる。

更に、CVD 用プラズマ源の成膜に関する問題点としては、

(5) 大面積プロセスを可能にする大面積で一様なプラズマの生成。

(6) ラジカルの時間・空間的制御⁽¹⁾。

(7) 高速成膜, 高速・高アスペクト比エッチングを目的とした共鳴領域の利用に関することが注目されている⁽²⁾。本研究では, 特に(1), (3), (5)の観点に立ってCVD用プラズマ源を開発することを目的とした。

ところで, 多くのCVD用ECRプラズマ源では, 2.45 GHzのマイクロ波に共鳴する875 Gauss(G)の磁界を用いており大面積の成膜は困難とされている。しかし, 放電に関して本研究ではマイクロ波の代わりにVHF帯の144 MHzを用いたので, 数十Gの弱磁界で60 cmφの大直径プラズマを得ることができた。更に, 成膜に関しては144 MHzを用いると他の周波数に比べてラジカルが多く生成されて良質成膜されることが報告されている⁽³⁾。しかしながら, VHF帯を用いた大直径のプラズマ源の特性はいまだ報告されていないと思われる⁽⁴⁾。

ここではまず, プラズマの生成はホイッスラー波⁽⁵⁾によって行われていることを検証した。また, 電子密度分布を測定しプラズマの一様性を調べた。更に, イオンエネルギーを測定し低イオンエネルギーのプラズマを得ることができた。また, このプラズマを利用して, SiO₂成膜の実験を試みた。プラズマ中のイオンエネルギー・イオン密度はファラデーカップにより, 電子温度・電子密度はラングミュアプローブ法により解析した。

2. 実験装置とパラメータ解析

〈2・1〉 実験装置 図1(b)に, 実験装置および測定系を示す。大型チャンバ(1 mφ×2 m)内を, 油拡散ポンプ, 油回転ポンプおよび補助ブースタを用い 1×10^{-6} Torrまで真空にする。ガスはArおよびSiH₄(1%)+Ar, SiH₄(1%)+N₂を用い, ガス圧は $0.6 \sim 1.8 \times 10^{-4}$ Torrである。チャンバ内にヘリカル

アンテナ(60 cmφ×40 cm, 3 回巻)を整合可変コンデンサを通して設置し, 100 Hz の方形波により振幅変調された144 MHzの高周波を印加し, 外部コイルによって生成された磁界との相互作用によってプラズマを発生させた。プラズマパラメータの測定には, ヘリカルアンテナの端部(径方向15 cm)に固定されたファラデーカップと, 軸方向, 径方向に可動できる

(a)

(b)

図1 (a)入力高周波形と(b)大直径プラズマ源

Fig. 1. (a) Wave pattern of input power, (b) large diameter plasma source.

図2 電荷密度揺動測定回路

Fig. 2. Diagram of measurement circuit for plasma mode produced by a Whistler wave.

ラングミュアプローブを用いて行った。

〈2・2〉 放電モードの測定系 プラズマの生成機構を調べるために、干渉法を用いて電荷密度揺動の測定を行った。測定系を図2に示す。中心軸上軸方向駆動のラングミュアプローブの電子飽和電流を $100\ \Omega$ を介してボックスカー積分器に入力する。ボックスカー積分器では、 $100\ \text{Hz}$ の発振器に同期させアフタグロー後すぐゲート幅 $1\ \mu\text{s}$ でサンプリングを行いミキサに入力する。また、 $144\ \text{MHz}$ の発振器の出力を1ターンコイルによりピックアップし、アッテネータを通しミキサへ入力する。ミキサでは高周波による電子密度の時間的変動分が取り除かれ、軸方向に可動するラングミュアプローブにより放電モード決定のための波形がシグナルアナライザに記録される。

〈2・3〉 プラズマパラメータの測定方法 図3はファラデーカップによるイオンエネルギーとイオン密度を測定した一例である。ここでは、ファラデーカップのグリッドに負バイアス電圧を印加して、電子電流を遮断しコレクタにイオン電流のみ流入させる⁽⁶⁾。掃引発振器を用い10秒間周期でのこぎり波をコレクタに印加し (V_p はコレクタ電圧)、コレクタに流入してくる電流をシグナルアナライザに記憶させ、 GPIB インタフェースを介してパソコンで処理すると図3が得られる。イオン温度 T_i は、イオン電流 I_p の対数プロット $\log(I_p)$ の傾きの逆数から求めることができる。また、イオン密度 N_i は、

$$N_i = \frac{I_i}{eS\sqrt{kT_e/M}} \dots\dots\dots (1)$$

なる式から算出した⁽⁷⁾。 I_i はイオン飽和電流であり、 e は電子 (イオン) の電荷量、 M は Ar イオンの質量、 k はボルツマン定数、 S はコレクタの面積である。

図3 イオン電流のパーソナルコンピュータ処理

Fig. 3. Personal computer analysis of ion current.

また、ラングミュアプローブによる電子温度 T_e と電子密度 N_e の測定は文献を参照されたい⁽⁷⁾。ここでは高周波の影響を避けるためにサンプリング法を用いた。

〈2・4〉 成膜実験系 図1に示すように直径約 $62\ \text{mm}$ 、厚さ $0.38\ \text{mm}$ のシリコンウェーハ (N形〈100〉配向面) を磁界 B に垂直に配置した。ヒータとバイアス電圧は用いなかった。成膜後はスパッタにより金蒸着して走査形電子顕微鏡 (SEM DS-130) で表面を観測した。膜厚はエリプソメータで測定し、薄膜成分は ESCA 750 により分析した。

3. 実験結果および検討

〈3・1〉 放電可能領域と放電モードの検証 図4に $\text{SiH}_4(1\%) + \text{N}_2$ ガスを用い吸収電力 P (入射電力-反射電力) $150\ \text{W}$ のとき、プラズマ生成領域のガス圧と磁界強度の関係を示す。磁界強度が $60\ \text{G}$ (中心軸上) 以上では、プラズマがヘリカルコイルの内部および軸方向延長空間に生成された。約 $60\ \text{G}$ 以下の磁界強度ではチャンバとヘリカルアンテナ間の高周波放電によりプラズマが生成された。また、磁界強度が電子サイクロトロン共鳴磁界であるところの $51\ \text{G}$ 近傍では、プラズマはコイル内では生成されず、チャンバ壁とヘリカルアンテナ間に生成された。なお、共鳴磁界 ($51\ \text{G}$) でプラズマが生成されない理由は現在のところ不明である。ここでは、 $60\ \text{G}$ より上の領域をホイッスラー領域と呼ぶことにする。

図4 プラズマ生成領域

Fig. 4. Discharge area by Whistler wave ($P=150\ \text{W}$).

図5に、Arガスをを用い磁界強度75 G, 吸収電力を150~200 Wに変化したときの磁界に平行な方向の電荷密度揺動を測定したものを示す。波長 $\lambda_{\parallel}$ は電荷密度揺動の波形から求めた。電子密度 N_e が、

図5 軸方向における電荷密度揺動
Fig. 5. Wave pattern of Whistler mode (pressure 1.5×10^{-4} Torr, $B=75$ G).

$1.05 \sim 2.35 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ と大きくなるにつれて波長が24~13 cmと短くなっている。これは、従来行われているホイッスラー波の傾向⁽⁸⁾⁽⁹⁾と同じである。また、図5より減衰係数を求めた。吸収電力が150~200 Wと変化し、電子密度が $1.05 \sim 2.35 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ と増加すると、減衰定数は $1.50 \sim 1.15 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ と減少した。これは、河合らの結果⁽⁸⁾と定性的に同じ傾向である。

図6は磁界強度を一定にしたとき($B=75$ G), 電子密度と波長 $\lambda_{\parallel}$ の上記の実験の分散関係の理論値との比較をしたものである。波長 $\lambda_{\parallel}$ の理論値は

$$\frac{4.3 \times 10^4}{\lambda_{\parallel}^2} = \frac{N_e / (2.56 \times 10^8)}{(B/51) - 1} \dots \dots \dots (2)$$

なるホイッスラー波の一次元モデルの式⁽¹⁰⁾から算出した。これを見ると、理論値と測定値はほぼ一致して

図6 ホイッスラー波の分散関係
Fig. 6. Dispersion relation of whistler wave (theory: from Eq. (2), exp.: from Fig. 5).

図7 電子温度の空間分布
Fig. 7. Electron temp. profile in large diameter helical plasma source.

図 8 電子密度の空間分布

Fig. 8. Electron density profile in large diameter helical plasma source.

いる⁽⁹⁾。

以上より、この大直径プラズマの生成モードはホイッスラー波によることが確認できた。

〈3・2〉 プラズマパラメータの測定結果 大直径プラズマ源において、プラズマパラメータを測定した結果を示す測定時プローブ面は時々イオンボンバードを行った。

(1) 電子温度・電子密度の空間分布 図 7 (a), (b) に $\text{SiH}_4(1\%) + \text{Ar}$ の設定圧力を $0.5 \sim 1.0 \times 10^{-4}$ Torr 一定にしたときの径方向、軸方向の電子温度分布の測定結果を示す。電子温度はプローブの位置に対して $7 \sim 5$ eV とほぼ様な値である。

図 8 (a), (b) に $\text{SiH}_4(1\%) + \text{Ar}$ の設定圧力を $0.8 \sim 1.5 \times 10^{-4}$ Torr 一定にしたときの径方向、軸方向の電子密度分布の測定結果を示す。径方向の場合において、電子密度はヘリカルコイルの中心から端部にかけて $1.0 \sim 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 程度の均一な密度 ($\Delta N_e/N_e \leq 2\%$) が得られ、ヘリカルコイルの半径を越える外部では電子密度が急に落ちている。また、軸方向に対しては $1.0 \sim 1.1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 程度の均一な密度 ($\Delta N_e/N_e \leq 6\%$) が得られた。更に、ガス圧力を増加させると電子密度は増加している。以上により、プラズマがヘリカルコイル内 $60 \text{ cm}\phi$ でほぼ均一に生成されていることがわかった。

(2) イオンエネルギー・イオン密度の測定

図 9 に Ar の設定圧力を 1.2×10^{-4} Torr 一定にしたときの直流磁界強度に対するイオンエネルギー E_i の特性を示す。同図の挿入図では、イオン電流の微分を破線で示し、そのピークに対する横軸のエネルギーを E_i とした。磁界強度が $70 \sim 95$ G に増加すると、プローブ特性のセミログプロットから求めたイオン温

図 9 直流磁界-イオン温度、イオンエネルギー特性

Fig. 9. Ion temp. and ion energy vs. magnetic field.

図 10 直流磁界-イオン密度特性
Fig. 10. Ion density vs. magnetic field.

図 11 シリコン薄膜作成時の SEM 写真
Fig. 11. Microphotograph of amorphous silicon film deposited by whistler device.

図 12 シリコン成膜時の ESCA 750 出力
Fig. 12. Output by ESCA 750 from amorphous silicon surface.

度は $1 \sim 0.5$ eV に減少する。これは、共鳴磁界強度である 51 G をはずれて磁界強度が 70 G へ増大したために、イオンエネルギーが低下するためであると思われる。なお、イオンエネルギー分布の半値幅から求めたイオン温度 ΔT_i はこの 2 倍程度大きい。

図 10 に Ar の設定圧力を $0.6 \sim 1.8 \times 10^{-4}$ Torr 一定にしたときの直流磁界強度に対するイオン密度の特性を示す。磁界強度が 70~90 G に増加するとイオン密度は $1 \sim 5 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ に増加する。これは、磁界強度の増加に伴ってプラズマの閉じ込め効果が増大したためである。また、ガス圧力を増加させるとイオン密度は増加する。

〈3・3〉 成膜実験⁽¹¹⁾ 成膜ガスは $\text{SiH}_4(1\%) + \text{Ar}$ を使い、ガス圧力 1.5×10^{-4} Torr で SiO_2 の成膜を試みた。プラズマは図 1 (a) に示すように 144 MHz の VHF 帯高周波 (繰返し 100 Hz, パルス幅 2.5 ms の振幅変調波) により生成する。

図 11 は約 1 時間プラズマ中にウェーハを配置 (図 1 (b)) した後の SEM 写真である。約 $2 \mu\text{m}$ の粒はスパッタで金蒸着したための金の小塵である。膜厚はエリブソメータで測り約 600 Å であった。

図 12 は ESCA 750 により分析した結果である。図

12 (a) は成膜後、(b) 図は成膜前の出力で、結合エネルギーが約 5 eV 増しケミカルシフトしている。 SiO_2 薄膜が生成されていると思われる。なお電極の不純物などの発生は ECR 電極につき検討されているが⁽¹²⁾、本実験ではステンレス鋼電極のため、銅電極よりは不純物の混入が少ないと思われる。

4. ま と め

VHF 帯を用いた CVD 用プラズマ源を開発し、その諸特性を測定して以下のような結果を得た。

(1) 生成されたプラズマの電荷密度揺動を干渉法で測定したところ、プラズマの放電モードはホイッスラー波によって生成されることがわかった (図 4~図 6)。

(2) 電子温度・電子密度を可動ランミュアプローブで測定して、大直径 (60 cmφ) で一様な (径方向: $\Delta N_e/N_e \leq 2\%$, 軸方向: $\Delta N_e/N_e \leq 6\%$) プラズマが生成されることがわかった (図 7, 図 8)。

(3) イオンエネルギーをファラデーカップで測定した。磁界強度が 95 G 程度のとき共鳴磁界より強磁界側でイオンエネルギーが低くイオン密度が大きいことがわかった (図 9~図 10)。

(4) この大直径プラズマを用い一例として、 SiO_2 薄膜の成膜実験を行った。なお、電極不純物混入の測定は大切ではあるが、今回は行わなかった (図 11~図 12)。

本研究に際しファラデーカップの提供に御協力下さった長崎総合科学大学 久保治也教授に厚く感謝します。日ごろ激励下さる武田 進先生、および中部大学 岩田幸二副学長に感謝いたします。また、本研究において御協力下さった中部大学 林 洋司助教授、名古屋文理短期大学 山住富也助手に感謝の意を表します。本研究は、文部省科学研究費補助金重点領域研究-反応性プラズマの制御および中部大学総工研費によって援助された。

(平成 4 年 8 月 7 日受付, 同 5 年 5 月 6 日再受付)

文 献

- (1) H. Kojima, T. Nakano, H. Toyoda & H. Sugai: "Analysis of Neutral Radicals in a RF Methane Plasma", Proc. 7th Symp. on Plasma Processing, p. 209 (1990)
- (2) S. Samukawa, Y. Nakagawa & E. Wani: "ECR Position Etching Technology for ULSI Productions", Proc. Symp. on Dry Process, p. 99 (1990)
- (3) S. Oda, J. Noda & M. Matsumura: "Generation of Electron Resonance Plasma in the VHF Band", Japan. J. Appl. Phys., 28, L1860 (1989)
- (4) 池沢・山住・伊藤・滝・岡田・今井・寺田・貴田: 「静磁界を用いた CVD 用プラズマ源の開発」, 名古屋大学プラズマ研究所技研報告, p. 215 (昭 63)

- (5) T. Nakano, R. A. Gottscho, N. Sadeghi, D. J. Trevor, R. W. Boswell, A. J. Perry, T. C. Lee, K. P. Giapis & J. Margot: "Helicon Wave Excited Plasma", 応用物理, **61**, 711 (平4)
- (6) S. Ikezawa, A. Ito, N. Kato & K. Kida: "Characteristics of Large Diameter ECR Plasma Source for CVD in the VHF Band", Proc. Intern. Seminar Reactive Plasmas, p. 57 (1991)
- (7) 武田 進: プラズマの基礎, p. 208 (昭44) 朝倉書店
- (8) A. Komori, M. Sugimoto, M. Tanaka & Y. Kawai: "High Density Plasmas Produced by Helicon Wave", Proc. 9th Symp. on Plasma Processing, p. 303 (1992)
- (9) T. Shoji: "Large Diameter Plasma Production by M=0 Whistler Wave", *IPPJ Annual Review*, p. 63 (1986-1987)
- (10) F. F. Chen: Introduction to Plasma Physics, p. 117 (1974) Plenum Press
- (11) S. Ikezawa, T. Ito, H. Okada, K. Kida, Y. Hayashi & S. Takeda: "Development of ECR Plasma Source and Its Application", Proc. 9th ISPC, Italy p. 1798 (1989)
- (12) A. Yonesu, A. Komori & Y. Kawai: "Impurity Ions in a Plasma Produced by Electron Cyclotron Resonance Heating", *Japan. J. Appl. Phys.*, **27**, 1482 (1988)

加 藤 法 之 (非会員)

平成3年中部大学工学部卒業。現在、同大学大学院工学研究科在学中。2電子温度プラズマ中のソリトンの研究などプラズマ物理の研究に従事。

池 沢 俊治郎 (正員)

昭和42年山梨大工学部卒業。47年名古屋大学大学院博士課程修了。同年中部大学工学部講師, 51年同助教授, 61年同教授, 現在に至る。工学博士。現在, プロセッシングプラズマ源などの研究に従事。日本物理学会, 電子情報通信学会, 応用物理学会, プラズマ・核融合学会, 放電研究グループ会員。

伊 藤 彰 浩 (准員)

平成4年中部大学工学部卒業。現在、同大学大学院工学研究科在学中。プロセッシングプラズマ源などの研究に従事。

貴 田 桂 介 (非会員)

昭和42年名古屋大学大学院修士課程修了。現在, 中部大学工学部講師。現在, 電磁波吸収体の開発に従事。工学修士。電子情報通信学会, 日本物理学会会員。