

# 産業界における高真空，電子，プラズマ技術

High Vacuum, Electron, and Plasma Technology in Industry

坪井 秀夫

TSUBOI Hideo

高真空やプラズマは、半導体や電子部品の製造において必要不可欠な技術である。高真空は相当に低い圧力である。プラズマ中の電子は素粒子の一種である。また電子は中性粒子と衝突し、イオンを作り、プラズマを生成する。本稿では産業界で利用される高真空、電子およびプラズマについて説明する。

High vacuum and plasma are indispensable technologies in the manufacturing of semiconductors and electronic devices. A high vacuum is a considerably low pressure. Electrons in plasma are a type of elementary particle. Electrons also collide with neutral particles to make ions, which produce plasma. This article describes, the high vacuum, electrons, and plasma used in industry.

キーワード：高真空技術，電子，プラズマ生成，プラズマ技術

## 1 はじめに

極限環境技術と聞いて、まず高真空や超高真空が頭に浮かんだ。真空技術は半導体や電子部品製造の分野で広く利用されている。次に頭に浮かんだのが電子である。これも半導体や電子部品製造の分野で広く利用されているプラズマの中に存在する。極限という言葉を広辞苑（第三版）で引いてみると「ぎりぎりのところ。はて。」とある。真空容器内の気体を真空ポンプで排気して行くと、容器内の圧力は中真空領域から高真空領域に入り、次には超高真空領域に近づいて行く。超高真空領域が極限とか、はてと呼ぶに相応しい圧力領域であろう。ただし本稿では、現在の日本産業規格（JIS）の定義に則り、高真空について記述する。高真空は相当に圧力の低い状態であり、真空容器内で表面処理を施されるシリコンウエハ等の基板にとっては、そのような条件の環境ということになる。

電子は素粒子の一種である。素粒子とは「知られている限りでは、それより簡単な粒子から構成されてはいない粒子のこと」と物理学辞典にある<sup>1)</sup>。電子は極限、はてといった言葉に相当する粒子である。半導体や電子部品製造の分野では、真空のプラズマが広く利用されており、そのプラズマ中には電子が存在する。電子は中性粒子に衝突し、イオンを作り、プラズマを生成する。本稿

では、産業界において必要不可欠な高真空、電子、および電子が作るプラズマについて説明する。

## 2 高真空技術

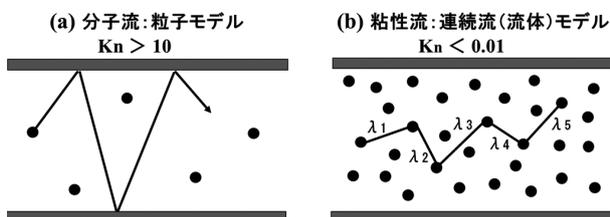
超高真空というと、以前は $1 \times 10^{-5}$  Pa以下の圧力を指していた<sup>2)</sup>。しかし現在では、 $1 \times 10^{-6}$  Pa未満で $1 \times 10^{-9}$  Pa以上の圧力領域とJISでは定義されており、高真空領域が広がった<sup>3)</sup>。真空の状態は、その圧力領域により5つの領域に区分される。表1において、1994年当時の区分と、2021年9月（現在）の区分の両方を示す。現在の区分において、標準大気圧は $1.013 \times 10^5$  Paなので、高真空と超高真空の境界は大気圧の $10^{11}$ 分の1であり、これは相当に低い圧力である。

半導体製造用プラズマ装置においては次のようなプロセスの流れを実施している。まず真空容器（チャンバ）内を、現在の区分で超高真空領域に近い側の高真空領域まで排気する。次にプロセスに必要なガスをチャンバ内に導入して圧力を設定し、電力を供給してプラズマを生成し、成膜やエッチング等のプロセスを実施する。プロセスが終わると電力を止め、ガス導入を止め、チャンバを超高真空に近い側の高真空領域まで排気し、次のプロセスに対応する。このように産業界では高真空技術が利用されている。

表1 以前と現在の真空の圧力領域<sup>2)3)</sup>

用語	領域 1994年当時	定義 JIS 2021年9月現在
低真空	圧力 100 Pa 以上	大気圧未満, 100 Pa 以上の真空
中真空	圧力 100 ~ 0.1 Pa	圧力 100 Pa 未満, 0.1 Pa 以上の真空
高真空	圧力 0.1 ~ $10^{-5}$ Pa	圧力 0.1 Pa 未満, $1 \times 10^{-6}$ Pa 以上の真空
超高真空	圧力 $10^{-5}$ Pa 以下	圧力 $1 \times 10^{-6}$ Pa 未満, $1 \times 10^{-9}$ Pa 以上の真空
極高真空	当時は, JIS ではまだ認められていなかった	圧力 $1 \times 10^{-9}$ Pa 未満の真空

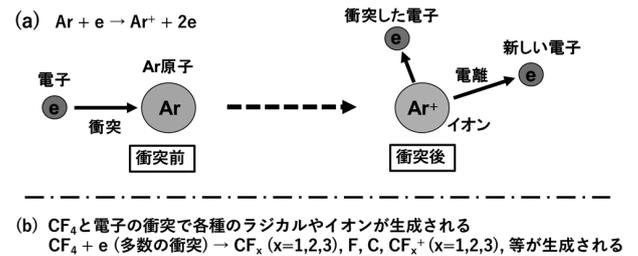
真空を考える場合大切な概念がある。それは、真空は分子流と粘性流（連続流）に大別できるということである<sup>2)</sup>。分子流の特徴は図1 (a) に示すように、運動する気体分子が衝突する相手が主にチャンバ壁であるということである。一方粘性流は、図1 (b) に示すように、気体分子同士の衝突が頻繁に起きる状態である。よって、分子流は粒子モデルで、粘性流は連続流（流体）モデルで近似できる。

図1 (a) 分子流（粒子モデル）と (b) 粘性流（連続流モデル）<sup>2)4)</sup>

粒子モデルと流体モデルを分けるものは圧力のみではない。図1 (a) の分子流において、気体分子から見てチャンバ壁までの距離が十分に長いと、低圧力であっても粒子が運動している間に粒子同士の衝突が何度も起こり、連続流（流体）になる。そこで、粒子モデルと流体モデルを分けるパラメータが必要になるが、それがクヌーセン (Knudsen) 数である<sup>4)</sup>。クヌーセン数  $Kn$  は平均自由行程  $\lambda$  と系の代表長さ  $L$  の比で定義される ( $Kn = \lambda / L$ )。図1 (b) に示すように、分子同士の衝突と衝突の間の距離の平均が平均自由行程である。また代表長さは配管の直径等である。

### 3 電子のふるまいと産業界のプラズマ

半導体や電子部品製造の業界で利用される真空のプラズマは、中性粒子の温度が低く電子温度が高い、いわゆる非平衡プラズマである。このようなプラズマを生成するのは大抵の場合電子である。電子が中性粒子に衝突し、電子を1つ弾き飛ばすことで中性粒子を電離（イオン化）させ、イオンを生成する。図2 (a) は電子がアルゴン原子に衝突し、アルゴンイオンが生成される場合である<sup>5)</sup>。一方図2 (b) に示すように、電子がエッチングガスである  $CF_4$  に衝突する場合は複雑で、イオンやラジカルを数種類生成する、即ち電離と解離（ラジカル生成）が生じる<sup>6)</sup>。プラズマ中の電子のエネルギーは揃っている訳ではなく、分布しており、平均的なエネルギーという意味で電子温度という言葉が用いられる。

図2 電子衝突による電離や解離のイメージ<sup>5)6)</sup>

次にプラズマプロセッシングにおけるエッチングの例を見てみよう。装置パラメータであるRFパワー、圧力、ガス流量等を設定し、プラズマを生成してこれを基板に照射し、表面をエッチングする。結果、エッチング速度やエッチング形状等といった結果が得られる。しかしこれだけではプラズマ特性に関する情報は得られない。そこで、装置やプロセスの開発を支援する目的で、プラズマ計測を実施する。プラズマの性質を表すプラズマパラメータの中でも、電子密度（プラズマ密度） $n_e$  と電子温度  $T_e$  は特に重要である。図3はラングミュアプローブを用いて測定された電流-電圧 (I-V) 特性である。このI-V 特性を解析して  $T_e$  と  $n_e$  を求める。

電子エネルギー分布関数がマクスウェル・ボルツマン分布 (Maxwellian) の場合は、電子温度を求める領域（図3中の補助線）が直線になる。

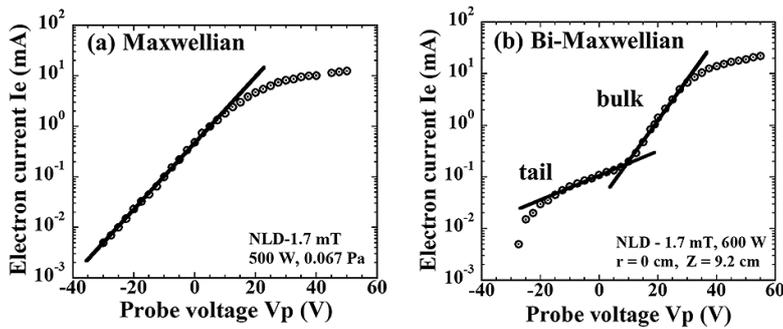


図3 プラズマ計測, 電子エネルギー分布<sup>7)8)</sup>

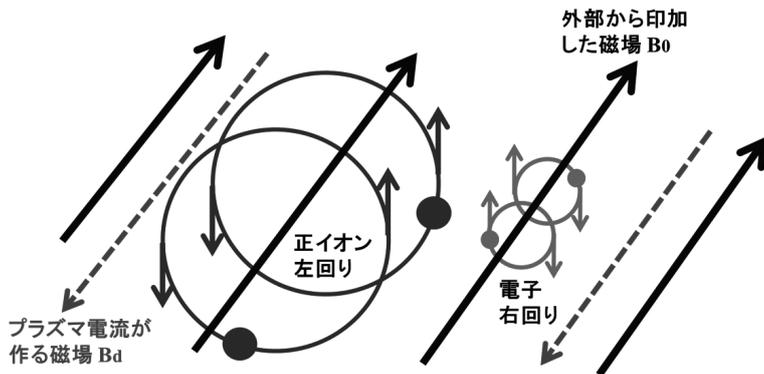


図4 サイクロトロン運動と反磁性のイメージ

図3 (a) はMaxwellianである。図3 (b) の場合は、電子温度を求める領域において直線が2本引けるが、これはプラズマ中の電子の集団が、bulkとtailという2つ成分から成ることを示している (bi-Maxwellian)。プラズマ中には密度の高い集団のbulkから離れて存在し、かつ高エネルギーで密度の低い集団のtail成分ができる場合がある<sup>7)8)</sup>。

## 4 産業界におけるプラズマ装置

### 4.1 磁化プラズマの特徴, 反磁性

産業界においては、外部から磁場を印加するタイプの磁化プラズマが広く用いられる。磁場があるとローレンツ力により、電子やイオンはサイクロトロン運動 (ラーモア運動) と呼ばれる旋回運動をする。図4において、磁力線の矢 (実線) の後方に立ち、矢の先端の方を見た場合の荷電粒子のサイクロトロン運動を考える。電子は磁力線の周りを右回りに小さく旋回する。一方正イオンは左回りに大きく旋回する。図4において、電子サイクロトロン角周波数 $\omega_{ce}$ は、素電荷を $e$ 、磁場 (磁束密度) を $B$  (図4中の $B_0$ )、電子の質量を $m_e$ とすると、 $\omega_{ce}=eB/m_e$ である<sup>9)</sup>。電子と正イオンの運動で、プラズマ中に電流が生じる。こ

のプラズマ電流が作る小さい磁場 $B_d$  (点線) は、外部から印加した磁場 $B_0$ を打ち消す方向に発生するため、プラズマは反磁性といわれる<sup>9)</sup>。

### 4.2 プラズマ源 その1: NLDプラズマ

磁気中性線放電 (magnetic Neutral Loop Discharge : NLD) プラズマは誘導放電に磁場を印加したタイプであり、その磁場配位に特長がある<sup>10)</sup>。NLDは核融合研究で見つかった現象が、半導体・電子部品製造装置に応用された例である。図5 (a) にNLDプラズマ装置の構造を示す<sup>11)</sup>。NLDは誘電体チャンバの外周に一巻きのRFアンテナを設置し、その外周に3段の電磁石を

配置する構造である。Top coilとBottom coilに同じ向きの電流を流し、Middle coilにこれらに対して逆向きの電流を流すとゼロ磁場のループがチャンバ内にできる。このループの近傍に誘導電流を流すことでNLDプラズマを生成する。NLDプラズマ源の下流 (図中の下部) に基板が装填される。NLDはドーナツプラズマを生成できるので、Siウエハのような丸い基板を処理する場合、面内均一性を向上できる。Middle coil電流を変化させれば、このドーナツの半径を変えることができ、プロセス上最適なドーナツ半径を設定できる。図5 (b) は、NLDのドーナツのArプラズマを装置の下部から撮影した写真である<sup>10)</sup>。ドーナツプラズマの外周には磁場の壁があるため、ドーナツの外周にある電子はこの磁気壁にトラップされる。よって、磁気壁の中のドーナツプラズマは、電子にとっては動き易い流路のような空間となり、このドーナツに沿って電子電流が流れる。

### 4.3 プラズマ源 その2: ECRプラズマ

図5 (a) のNLDプラズマ源を電子サイクロトロン共鳴 (Electron Cyclotron Resonance : ECR) プラズマに寄せ換えた場合を考える。電

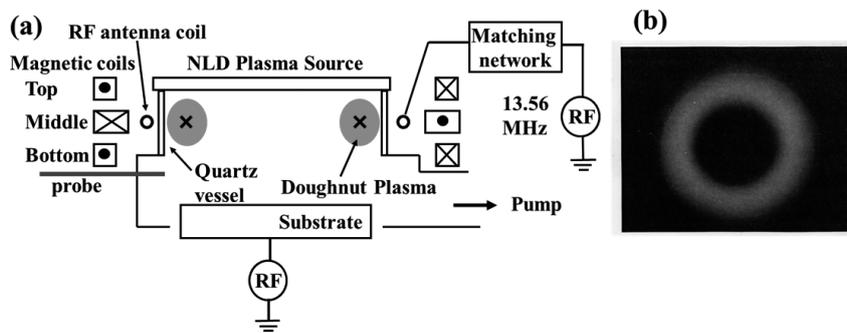


図5 (a) NLDプラズマ装置と (b) NLDプラズマの写真<sup>10)11)</sup>

子サイクロトロン運動の周波数 $f_{ce} (= \omega_{ce}/2\pi)$ と、プラズマへ導入するマイクロ波の周波数 $f$ を一致させればECRという共鳴現象が起きる。マイクロ波の周波数 $f$ が2.45 GHzの場合、ECR条件となる磁場 $B$ は0.0875 Tである。では2.45 GHzのマイクロ波を使用し、チャンバ内に0.0875 Tの磁場を設ければECRプラズマが効率良く生成できるかというとは実はそうではない。ECR条件より強磁場側からマイクロ波を導入しないと効率良くECRプラズマを生成できないこのことは、CMA (Clemmow-Mullaly-Allis) 図が教えてくれる<sup>9)</sup>。CMA図は磁化プラズマ中の4種類の波動(右円偏波, 左円偏波, 正常波, 異常波)を1枚の図にまとめた有益なものであるが、その内容はかなり難しい。

## 5 おわりに

極限環境技術として、高真空、電子のふるまい、そして電子が生成するプラズマを例に取り説明した。半導体や電子部品製造の分野において、これらが重要な役割を担っていることをご理解いただけたならば幸いです。近年、真空のプラズマに限らず大気圧プラズマも注目を集めている。大気圧プラズマを産業に応用する場合でも、真空のプラズマで得られた知見は有益なものとなるであろう。筆者は化学部門の技術士で日本技術士会の副会長であられた故 本田尚士先生から、 $\pi$ 型人間になることの重要性を教わった。プラズマ技術と真空技術を $\pi$ 型の2本の足に定め、活動している。

### <参考文献>

1) 清水忠雄, 清水文子 監訳: 「ロングマン物理学辞

典」, p.349, 朝倉書店, 1998年2月10日初版第1刷

2) 中山勝矢: 「新版 真空技術実務読本」, pp. 4-5, 13, オーム社, 1994年5月20日 第1版第1刷発行

3) 日本規格協会: 「JIS 真空技術一用語一第1部: 一般用語」, JIS Z8126-1:2021」, pp.2-3, 2021年9月21日改正

4) 楠本淑郎: 「無次元数から見た化学気相成長法の流れ」, 真空, 第40巻 第2号, pp.69-76, 1997年

5) 進藤春雄: 「3. 身近にあるプラズマの応用例」, 公益社団法人日本技術士会応用理学部会創立15周年記念シンポジウム講演集, p.69, 2016年11月13日

6) 菅井秀郎 編著: 「インターユニバーシティ プラズマエレクトロニクス」, オーム社, pp. 4, 5, 136, 2000年8月25日 第1版第1刷発行

7) H. Tsuboi, et al.: "Observation of Induction Power Dependence on the Magnetic Neutral Loop Discharge Plasma Thermalization Phenomena", Jpn. J. Appl. Phys. 36, pp.6540-6544, 1997.

8) 坪井秀夫: 博士学位論文, 「磁気中性線放電プラズマの生成・制御と微細加工への応用に関する研究」, pp. 112, 118, 名古屋大学, 2012年3月を基に作成

9) 後藤憲一: 「プラズマ物理学」, pp.12, 55-56, 134-136, 共立出版, 1967年6月1日 初版1刷発行

10) H. Tsuboi, et al.: "Usefulness of Magnetic Neutral Loop Discharge Plasma in Plasma Processing", Jpn. J. Appl. Phys. 34, pp.2476-2481. 1995.

11) H. Tsuboi and S. Ogata: "Observation of Characteristics of Magnetic Neutral Loop Discharge Plasma Appearing at Antenna in RF Circuit", Jpn. J. Appl. Phys. 46, pp.7475-7477, 2007.

坪井 秀夫 (つばい ひでお)  
技術士 (応用理学部門)

合同会社 坪井技術コンサルタント事務所  
代表社員  
応用理学部会 幹事  
博士 (工学) 名古屋大学論文博士  
e-mail: h.tsuboi.ce@mopera.net

