

容量結合型プラズマ中における
高アスペクト比ホール底部の
チャージアップ挙動に関する研究

森山 誠

目次

第1章	序論	1
1.1	半導体メモリ製造におけるエッチングプロセス	1
1.1.1	フラッシュメモリの需要	1
1.1.2	半導体プロセス概要	2
1.1.3	デバイスプロセスにおけるプラズマ源	5
1.1.4	異方性エッチングプロセスの概要	8
1.2	ホールエッチングにおけるチャージアップ	11
1.2.1	チャージアップによる形状異常	11
1.2.2	高アスペクト比ホール底部に関する先行研究	12
1.3	本研究の目的	15
1.4	本論文の構成	16
	参考文献	17
第2章	二周波プラズマ装置製作とプラズマ特性評価	21
2.1	はじめに	21
2.2	装置設計の指針としてのプラズマシミュレーション	21
2.3	装置概要	24
2.3.1	装置構造	24
2.3.2	キャピラリープレート設置方法	27
2.3.3	キャピラリープレート電圧測定用高電圧プローブの較正	29
2.4	装置の基本特性評価	30
2.4.1	高電圧プローブによるRF電極電位測定	31
2.4.2	ラングミュアプローブ法	32
2.4.3	表面波プローブ法	37
2.4.4	キャピラリープレート抵抗の測定	46
2.5	まとめ	48
	参考文献	49
第3章	キャピラリープレート近傍の電荷密度評価法の確立	50
3.1	はじめに	50
3.2	高電圧プローブによる電圧波形測定	50
3.3	等価回路モデル構築及び回路パラメータ評価	56
3.4	キャピラリープレート上部の平均電圧推定	60
3.5	静電モデルによる電荷密度評価法の提案及び評価例	64

3.6	まとめ	68
	参考文献	69
第4章	定常状態におけるキャピラリープレート底部の電荷密度評価	70
4.1	はじめに	70
4.2	VHF 単周波における電荷密度評価	70
4.2.1	パルス放電における CP 底部電荷密度の AR 依存性	70
4.2.2	パルスプラズマと CW プラズマの電荷密度比較	77
4.2.3	キャピラリープレート近傍における荷電粒子の挙動	80
4.3	LF バイアス重畳時の電荷密度評価	83
4.3.1	パルス放電における CP 底部電荷密度の AR 依存性	83
4.3.2	負の荷電粒子流入メカニズム	87
4.3.3	キャピラリープレート底部蓄積面電荷密度のパルスデューティー比依存性	90
4.4	まとめ	96
	参考文献	97
第5章	パルス放電におけるキャピラリープレート底部の電荷密度時間分解測定	98
5.1	はじめに	98
5.2	電荷密度時間変化の電力依存性	98
5.3	リーク抵抗を含めた等価回路構築	103
5.4	パルスオン及びオフ時における荷電粒子流入量評価	111
5.4.1	パルスオフ時における電子流入量評価	111
5.4.2	パルスオン時のチャージアップ電流評価	114
5.5	まとめ	116
	参考文献	117
第6章	総括	118
6.1	本論文の結論	118
6.2	今後の展望	121
付録	122	
A.	シミュレーションの支配方程式及び基礎パラメータ	122
	参考文献	126
謝辞	127	
研究実績	128	

第1章 序論

1.1 半導体メモリ製造におけるエッチングプロセス

1.1.1 フラッシュメモリの需要

近年，IoT (Internet of things)，人工知能 (Artificial intelligence : AI)，第5世代移動通信システム(5th Generation : 5G)などの普及に伴い流通する情報量の爆発的な増加が起こっている。この流通する電子情報を保存し，記録し次に生かすことができる方法の一つにフラッシュメモリがある。メモリを使用する分野は，例えば，AI，自動運転，ロボット工学，産業，医療，娯楽など多岐に渡る[1]。メモリ形態のは図 1-1 に示すようにエンドユーザーが使用するフラッシュメモリやスマートフォンのストレージ，パーソナルコンピュータに使用される SSD (Solid State Drive)に限らず，データセンターのサーバーなどクラウド技術を介した形態があるため需要はますます増えて



SD・USBメモリなど



PCのRAMやSSD

図 1-1 様々な半導体メモリ形態の例

いる。

フラッシュメモリの歴史は長く、1987年に東芝が世界初の NAND (Not AND)型フラッシュメモリ図 1-2 (a)を発明し[2], 2007年には三次元構造の NAND 型メモリ(3D-NAND メモリ図 1-2 (b) を発表した[3]。そこから現在に至るまで 3D-NAND メモリが使われ続けている。近年では、メモリ容量密度を増やすために、1セルに多くのデータを蓄積できる多値化[4]やメモリセルを分割する手法[5]などが考案されたが、更なるメモリ容量が要求されている。3D-NAND (3 dimensions Not AND)においてメモリ容量を増加させる手法は電極の積層数を増やすという単純かつ困難な手法がある。この手法の現状と課題については1.2で詳述する。

1.1.2 半導体プロセス概要

フラッシュメモリは半導体デバイス的一种であり、大まかなプロセスは共通する部分が多い。そのため本項では多くの共通する半導体プロセスについて概説する。

半導体プロセスは大きく分けて前工程と後工程に分かれている(図 1-3)[6]。前工程とは、300mmにも及ぶ大口径シリコンウェハに図 1-4に示すようなイオン注

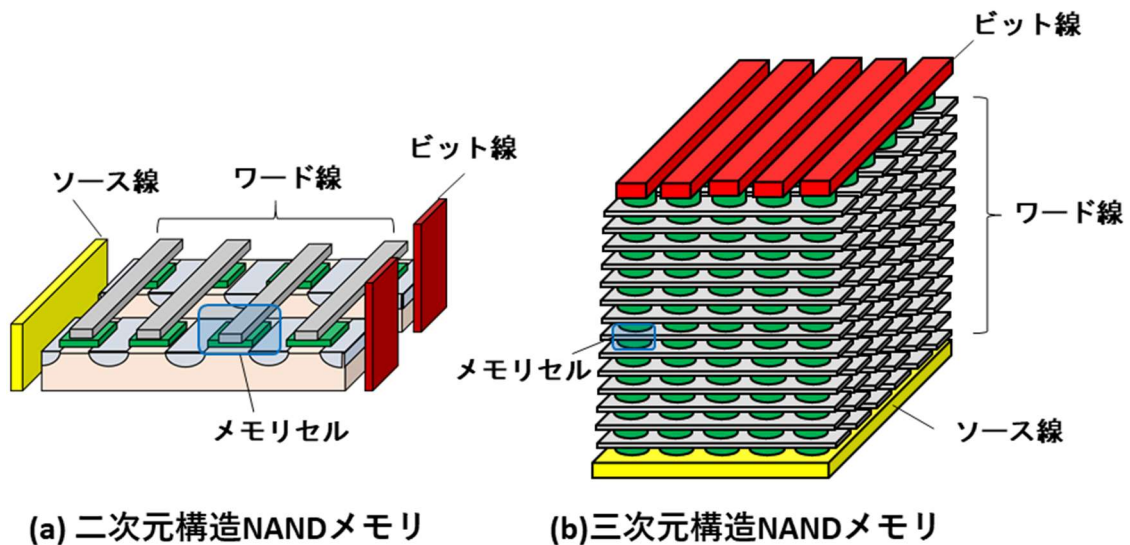


図 1-2 二次元と三次元の NAND FLASH メモリの構造の違い[1]

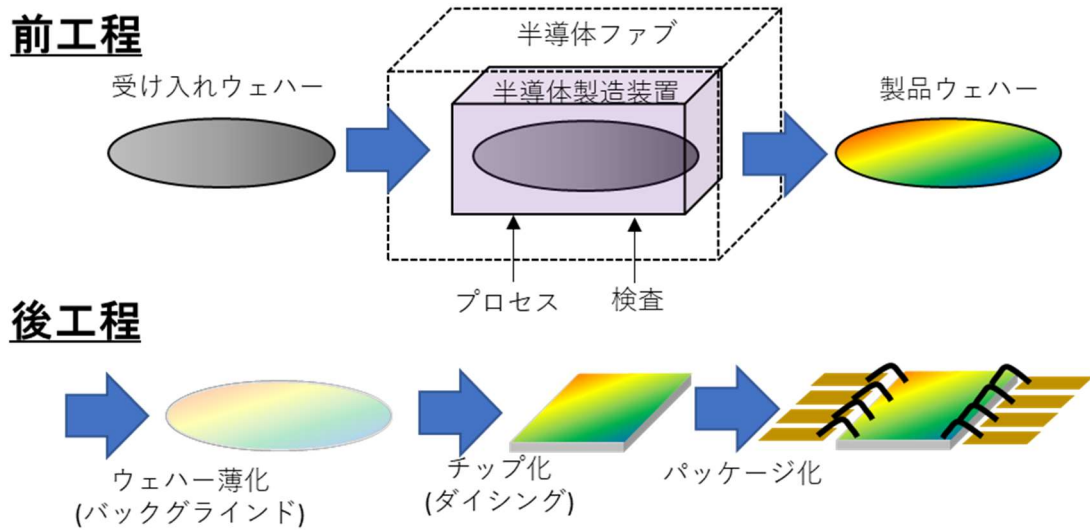


図 1-3 半導体メモリ製造工程[6]

入，リソグラフィ，エッチング，成膜などを施す工程である。イオン注入はシリコンに不純物となるイオンを注入することでホールや電子等のキャリアが生成される。リソグラフィはエッチングを行う際に重要となるレジストを構築する工程である。技術そのものは写真の露光と同様であるが，微細化を進めるために図 1-5 に示すようなさまざまな光源を用いた露光が行われてきた。1995 年ごろまでは超高压水銀ランプのスペクトル内の特徴的なピークである g 線(g-line)や i 線(i-line)が用いられていた。その後，2000 年頃に KrF，2005 年頃には ArF を基にした光源が用いられていた。図中の i-ArF は ArF 光源を用いつつ，ウェハーを液体に浸す(これを液浸(immersion)という)ことで分解能を向上させる手法であり近年まで使用されている。また，2014 年頃では露光を複数回行うことで分解能を向上させるダブルパターニング(Double patterning : DP)技術も併用されている。現在は EUV (Extreme ultraviolet) 光を用いることで 10 nm オーダーの分解能を持つパターニングが検討されている[7]。エッチング

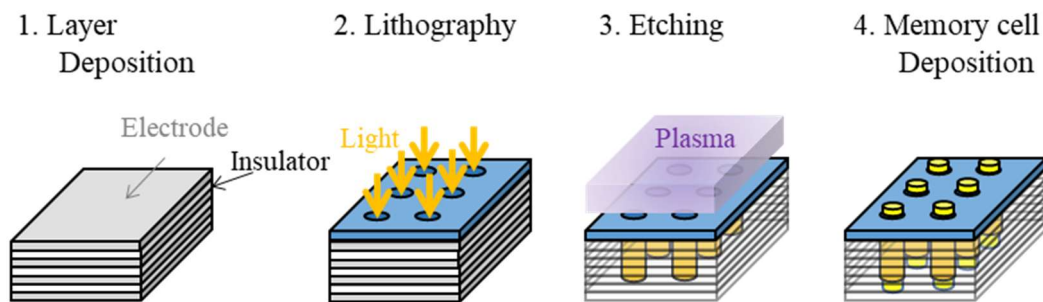


図 1-4 前工程におけるホールパターンプロセス例

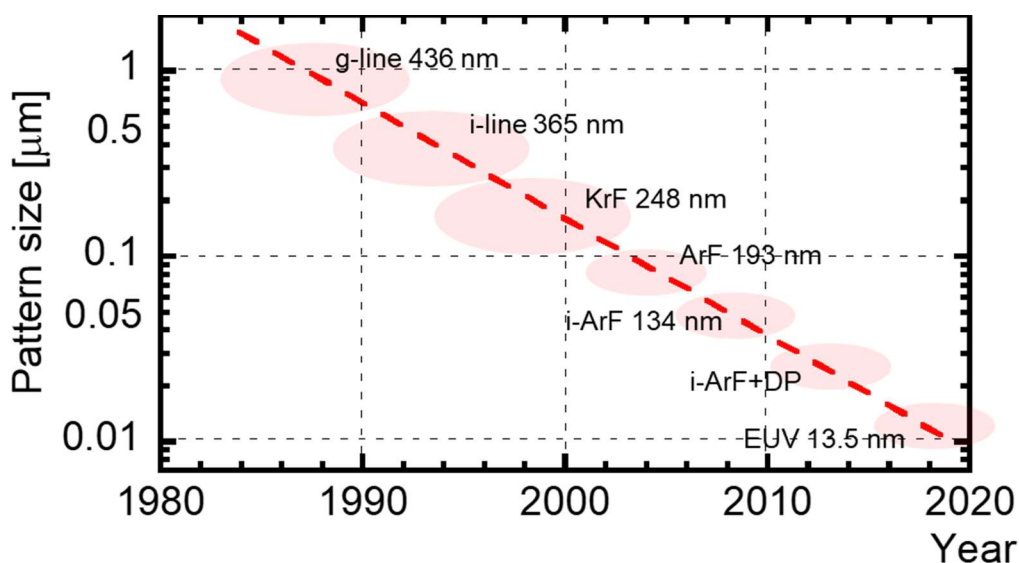


図 1-5 プロセスパターン形成のためのリソグラフィに用いられる光源の歴史[7]

は本研究の主題となるプロセスであり，反応性ガスのプラズマに曝して，活性な中性化学種(ラジカル)とイオンを照射することで被エッチング材料を揮発性の高い分子に変えて(例えば $\text{Si} + 4\text{F} \rightarrow \text{SiF}_4$)除去するプロセスである。詳細は 1.1.4 で述べる。エッチングを行った後，残ったレジストを除去する工程がアッシングである。アッシング及び洗浄が終わったウェハにメモリゲートなどを化学的気相成長(Cheical vapor deposition : CVD)法や，物理的気相成長(Physical vapor deposition : PVD)法による成膜して構成する。この工程でメモリセルが構築される。前工程の中でプラズマを用いたプロセスにはアッシング，エッチング，PVD や CVD による成膜プロセスが挙げられる。

後工程とは前工程を終えたシリコンウェハーを製品サイズのチップ(ダイ)に切るダイシング，基板にダイを張り付けるダイボンディング，電気配線を行うワイヤボンディングがある。この後工程を終え，検査を通過すると製品として出荷される。

1.1.3 デバイスプロセスにおけるプラズマ源

デバイスプロセスには，図 1-6 に示すように容量結合型プラズマ(Capacitively coupled plasma : CCP)，電子サイクロトロン共鳴(Electron cyclotron resonance : ECR)プラズマ，誘導結合型プラズマ(Inductively coupled plasma : ICP)，ヘリコン波プラズマなど様々なプラズマ源が使用されている[7]。CCP は材料加工に初めて本格的に用いられたプラズマ源[8]で，平行平板間に RF(Radio frequency)帯の高周波電力を印加することでプラズマを生成する。古典的な CCP の特徴としては，圧力が 100 Pa 程度と高

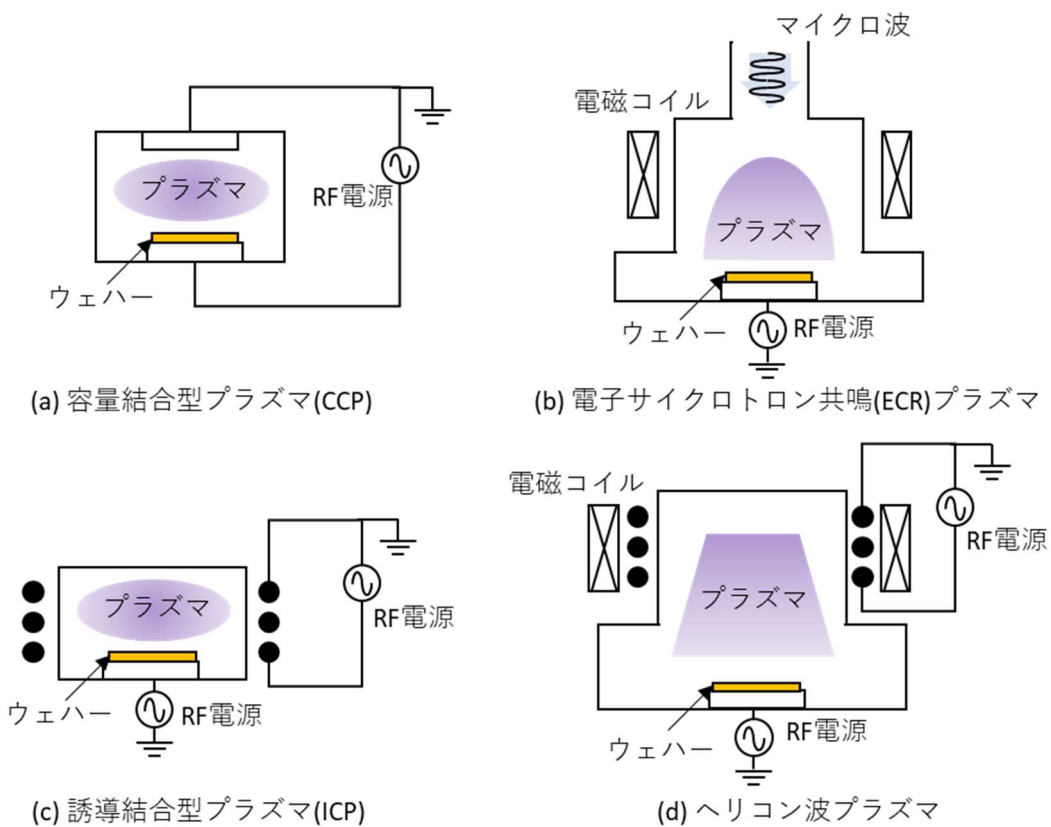


図 1-6 デバイスプロセスに用いられるプラズマ源[7]

く、プラズマ密度は 10^{10} cm^{-3} 程度と高くできるが、プロセスにおいて高圧力はガスの滞在時間を長くし、また衝突が増えることから異方性の担保が難しい。そのため、近年では 1 Pa 程度の低圧力環境でプロセスを行うがそのためプラズマ密度が低下し、プロセスの速度を低下させる問題が生じる。これを解決するため、高周波(High Frequency : HF)電力や超高周波(Very High Frequency : VHF)電力を印加することで 10^{10} cm^{-3} もの高密度プラズマを生成する手法が主流となっている。ECR プラズマは磁界とマイクロ波によるサイクロトロン共鳴を利用したプラズマ源で 1 Pa 程度の低圧力下で 10^{11} cm^{-3} の高密度プラズマを生成することができる。エッチングを行う際はステージに RF バイアスを印可することでイオンエネルギーを制御する。ICP はループ型アンテナに RF 帯の高周波電力を印可することで放電するプラズマ源で、ECR と同様 1 Pa 程度の圧力で 10^{11} cm^{-3} の高密度プラズマを生成できる。ヘリコン波プラズマとは ICP のような高周波電力による放電に直流磁界を重畳するプラズマ源である。

各プラズマ源は様々なプロセスに用いられる。アッシングプロセスにおけるプラズマ源は酸素雰囲気中で放電しウェハを曝すだけなので、比較的単純なマイクロ波プラズマや CCP が用いられる。プラズマを用いた成膜プロセスには 1.1.2 で述べた通り CVD と PVD が存在するが、CVD ではアノードカップル(ウェハーステージが接地)型 CCP や ICP などがある。ICP は CCP より高密度なプラズマを生成でき、高い気相成長速度が期待できる。PVD は金属物質を堆積させる手法として有用である。このプロセスでは CCP のカソードに堆積させる物質(ターゲットと呼ぶ)を設置し、イオン衝撃でスパッタすることで被堆積基板に堆積する。エッチングプロセスでは ICP, ECR プラズマ、ヘリコン波プラズマ, CCP が用いられる。例えばデバイスのゲート加工や Si, Al などの導電性物質の微細加工には高密度プラズマが生成可能な ECR や ICP が用いられるが、中電子密度、低滞在時間が求められる SiO_2 エッチングなどでは電極間距離 30 mm 程度の狭ギャップ CCP が使われる。

近年、高精度なエッチング性能を実現するとともにエッチング速度を向上させるために、プラズマを発生させる HF もしくは VHF 電力とバイアス電圧を発生させる低周波 (Low frequency : LF) 電力を組み合わせる高密度プラズマと高バイアス電圧を実現した二周波プラズマ (Dual Frequency Plasma : DFP) 源が使用されている[9][10]。この組み合わせにより、プラズマ密度とイオン衝撃エネルギーを独立して制御することで、精密なエッチングが可能となる。DFP については、理論[11]、実験[12]、シミュレーション[13][14]の観点から様々な研究がおこなわれてきた。

DFP の中でも SiO₂ エッチングによく用いられるのが二周波重畳容量結合型プラズマ (Dual frequency capacitively coupled plasma : DF-CCP) である。DF-CCP には図 1-7 に示すように、バイアス用の LF 電源と放電用の VHF 電源が異なる電極に設置された図中(a)のタイプと、同じ電極に設置された(b)のタイプがある。どちらも、高周波で高プラズマ密度を、低周波でバイアスを制御する点は他の DFP と同様とである。動作圧力は数 Pa 程度で、高周波は 27 - 60 MHz, 低周波は 0.8 - 2 MHz を使用することが多く、プラズマ密度は 10¹⁰ cm⁻³ 程度である。

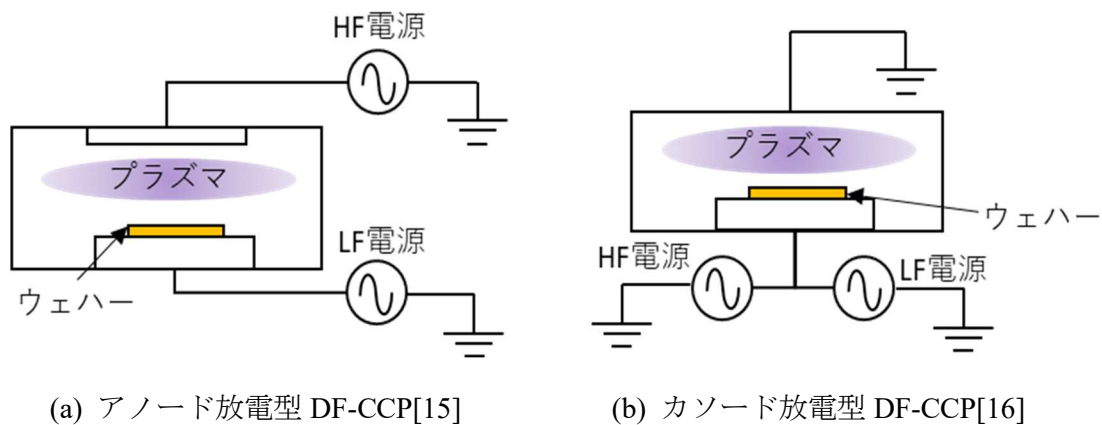


図 1-7 二周波重畳容量結合型プラズマ (a)バイアス電源と放電用電源が異なる電極に接続され, (b)バイアス電源と放電用電源が同じ電極に接続され, 対向電極が接地されている。

1.1.4 異方性エッチングプロセスの概要

異方性エッチングとは、指向性のあるエッチングのことである。特にプラズマ中の中性ラジカル及び正イオンを利用するものを反応性イオンエッチング(Reactive ion etching : RIE)という。その原理を図 1-8 に示す。供給からプロセスガスはプラズマ中で電子衝突を受けて電離や解離を経て、イオンと電子、そして中性ラジカルやポリマーを生成する。プラズマで生成されたラジカル種が被エッチング物質に付着して、シースで加速されたイオンがエネルギーを与えることでラジカルと被エッチ物質が反応を起こしバルクから脱離する。この時、シースで加速された高エネルギーかつ高指向性をもつイオンが反応のトリガーとなるため異方性をもつエッチングが可能となる。またプラズマで生成されたポリマーはエッチングされたパターン側部に付着して保護膜として働く。

異方性エッチングに求められる特性にはダメージ制御性、微細パターンの加工精度やエッチング速度などがある[17]。エッチングにおけるダメージとは物理的ダメージ[18]-[20]、電氣的ダメージ[21][22]及び光照射ダメージ[23]-[25]がある。パターンの加工精度とは材料の選択性や加工寸法に対する精度などがあり、特に寸法の精度は現在主流となっている 3D-NAND や DRAM(Dynamic Random Access Memory)製造のための高アスペクト比エッチングにおいて永遠の課題である。加工精度やエッチング速度はエッチングする材料とプロセスガス種、及びイオン衝撃の有無の組み合わせに大きく依存する。例えばシリコン(Si)のエッチングには塩素(Cl)系プラズマが用いられるが、これは Cl と Si との自発的な反応が遅く、イオンアシストによる反応速度が速いため異方性を持つ形状が形成できるためである[26]。一方、フッ素(F)を含むプラズマにおいては、自発的な反応が起こるため等方的なエッチングになりアンダーカット構造を形

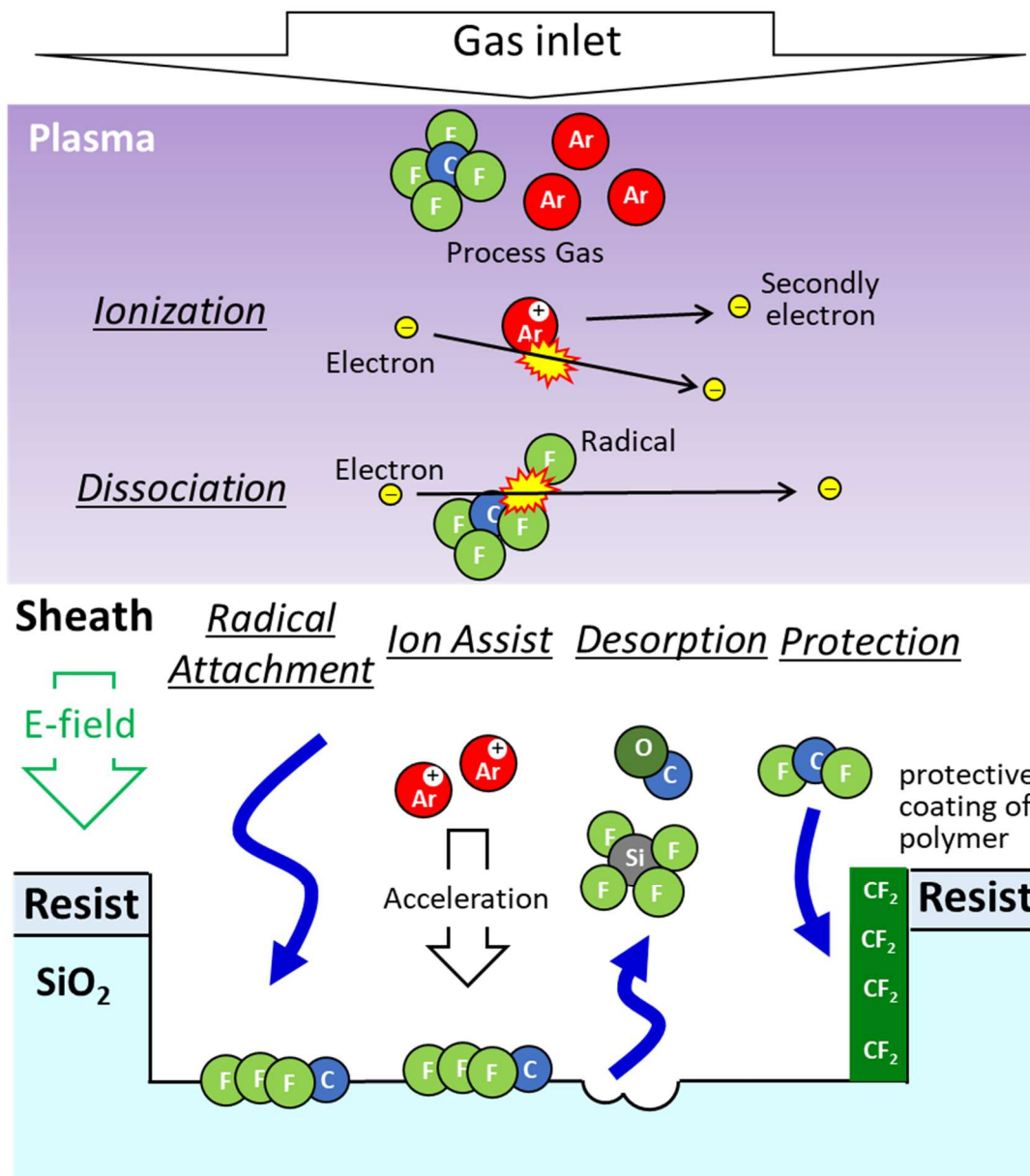


図 1-8 反応性イオンエッチングのメカニズム概略図

成する[26]。二酸化ケイ素(SiO₂)のエッチングにはFを含むプラズマが用いられる。FはSiO₂と自発的に反応を起こすが、強いイオンエネルギーによる促進作用により異方性のある形状を形成することができる[26]。

異方性エッチングをおこなう過程で想定しない形状(形状異常)が発生することがある。その一例を図 1-9 に示す。先述した(a)アンダーカットはその一つで、中性ラジカルによる等方的エッチングによりこのような形状が生じる。(b)テーパは異方性エッチングにより生成された物質がエッチングされた箇所近傍に堆積することで起こる。また、保護膜を形成する粒子種が付着しても同様にテーパ状となる(c)逆テーパはイオンのもつ角度分布が広い場合に、斜め入射したイオンによる RIE が生じることで形成される。(d)ボーイングはレジストにおける散乱やイオンの斜め入射により生じる。(e)マイクロレンチや(f)ノッチはパターン内部におけるチャージアップによるイオン軌道の歪みによって生じる。良好な異方性エッチングの達成には、基板材料に応じてガス種を選択し、さらにガスの解離やイオンエネルギーを制御できるプラズマ源が必要となる。

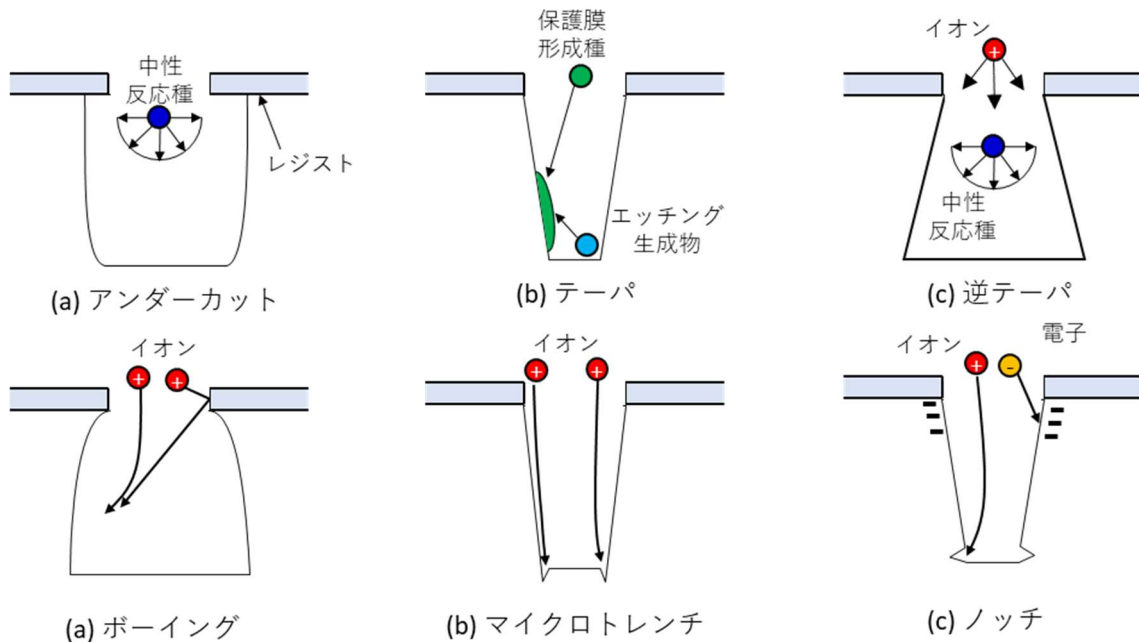


図 1-9 エッチングにおける形状異常例[17]

1.2 ホールエッチングにおけるチャージアップ

1.2.1 チャージアップによる形状異常

エッチングホールの形状制御についても集中的な研究がおこなわれている[27]-[31]。例えば、高アスペクト比（High Aspect ratio : HAR）エッチングでは、ボーイングが既知の問題であり、レジストのテーパ面で散乱した高エネルギーイオンがホールの側壁に衝突して局所的にエッチングが進行して発生する。また、図 1-10 に示すようなエッチングホールやトレンチのチャージアップは、表面の電荷がイオンの軌跡を歪め、形状異常とエッチング速度の低下を招くだけでなく、図 1-9 に示すマイクロトレンチやノッチのような形状異常も引き起こす。

実際のエッチングプロセスでは、被エッチング材料に依存してチャージアップの挙動が変化することが知られている。例えば、導電性ポリシリコンのオープンパターンエッジとナローパターンエッジのエッチング特性に関する研究では、実験[33][34]や

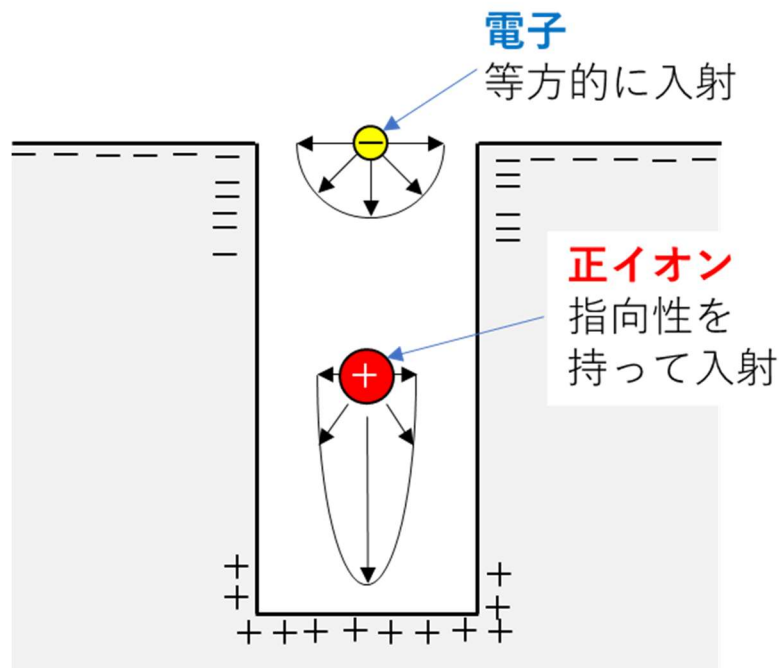


図 1-10 高アスペクト比ホールへの荷電粒子入射

シミュレーション[35]-[38]により、パターンに依存したチャージアップの挙動が示されている。誘電体に形成したホールにおけるチャージアップ挙動は、電荷蓄積がエッチング速度に及ぼす影響とともに広く研究されている[39]。さらに、エッチングホールの側壁に形成されたフルオロカーボン膜の導電性についても報告されている[40]-[42]。

ホールやトレンチの変形を最小限に抑えるためには、ホールやトレンチ内での電荷をキャンセルする必要がある。このために、蓄積された電荷を電子ビーム[43] や負イオン[44][45] を用いてキャンセルする方法が検討されている。ホールボトムでのチャージアップを抑制するための様々な手法の中で、現在、実際のエッチングプロセスにおいては、パルス駆動のプラズマ源[39][46]-[48]が有用であると考えられている。近年の高密度プラズマ源の開発を考えると、パルス運転による VHF プラズマ源の特性の理解は、将来の高アスペクト比(HAR)エッチングプロセスに重要な意味を持つ可能性がある。

1.2.2 高アスペクト比ホール底部に関する先行研究

高アスペクト比ホールのチャージアップ評価はホールを模擬するためキャピラリープレート(Capillary plate : CP)やマイクロチャネルプレート(Microchannel-plate : MCP)がしばしば用いられてきている。CP や MCP とは図 1-1 1 に示すような高アスペクト比の微細孔を持つ板である。穴径は 10 μm 程度で AR は低いもので 12, 高いもので 167 の製品が市販されている[49]。材質は鉛ガラスであり絶縁性があるため、 SiO_2 ホールパターンなどとして用いられる。

例えば、堀池らは CP を HAR のホール形状のマスクとして用いて、ホール底部に堆積するポリマーの性質を XPS(X-ray photoelectron spectroscopy)や SEM(Scanning

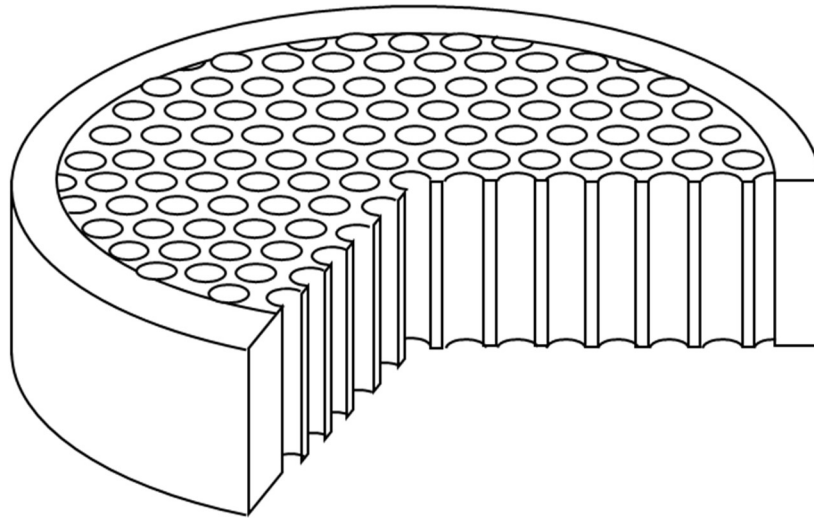


図 1-1 1 キャピラリープレート構造

electron microscope)を用いて調べた[50]。この時の CP のアスペクト比(Aspect ratio : AR)は 40, DC 自己バイアスは-300 V であり, 使用ガスは C_4F_8 単体と, C_4F_8 と 30% H_2 の混合ガスを用いた。その結果, H_2 添加した場合カーボンポリマーの膜がマスク底部に堆積することが確認されている。

HAR ホールのチャージアップ挙動の評価にも多くの研究者が CP を用いている。電極の挿入する箇所にエネルギー分析器付き質量分析計を設置して, イオンフラックスの評価やエネルギー分布測定を行った事例もある[51]-[54]。栗原らは 13.56 MHz でフルオロカーボン CCP を調べ, CP を通過するフルオロカーボンイオンの測定を行った。市販の小さな HAR 孔を持つプレートと特製の CP をエネルギー分析器付き質量分析計により試験した[51][52]。また, ASET(Association of Super-advanced Electronics Technologies)のグループにおいても同様に CP とエネルギー分析器付き質量分析計を組み合わせた試験を行った[53][54]。これらの結果から, HAR ホールを通過して検出されるイオン電流はホールに入射しているイオン電流よりも小さくなり, またイオンエネルギー分布(Ion energy distribution : IEDF)は低エネルギーが欠落することが解った。

また、この現象は導電性の CP では見られないことから、側壁のチャージアップが重要であることが示唆されている。

このような HAR ホールにおけるチャージアップを評価するためにも絶縁膜の高アスペクト比エッチングホールパターンとして帯電防止処理を施していない CP を用いる。図 1-1 2 に示すように CP 下部に挿入した電極の電圧を測る事でホール底部におけるチャージアップの評価が行われてきた[55][56]。大竹らは、13.56 MHz パルス駆動 ICP 中での特製 CP 底部の電圧変動を報告した[55]。この測定電圧をチャージアップの指標として考えたとき、パルス化すると HAR ホール底部のチャージアップが抑制できることが解った。根岸らは、200 MHz の ECR プラズマ中での MCP 底部 (AR:<20)のチャージアップ電圧とフルオロカーボンの成膜特性を調べた[56]。チャージアップ電圧は AR の増加と共に大きくなる傾向がみられた。また、ホール底部のフッ素(F)と炭素(C)の比率は AR の増加と共に低下する傾向が得られ、HAR になるにつれてエッチングの進行が困難になることが示唆されている。

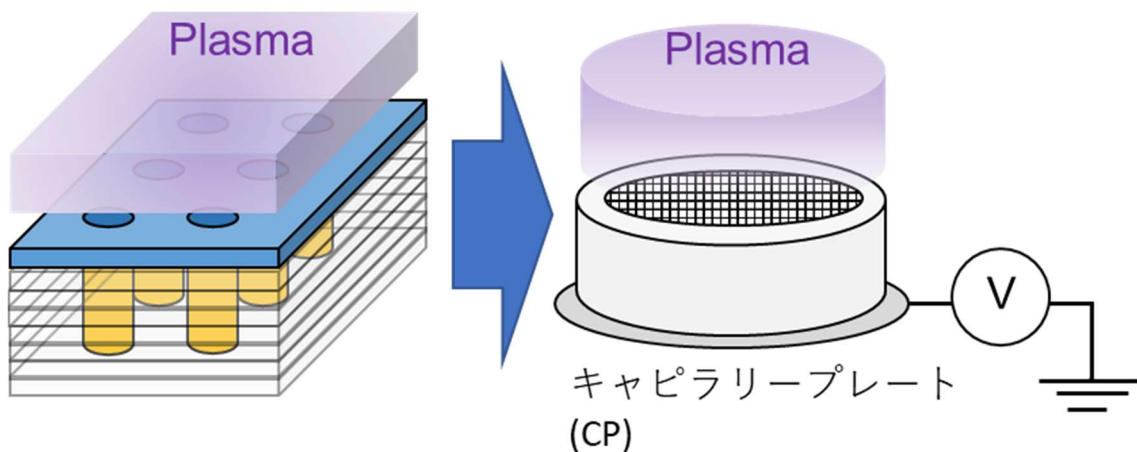


図 1-1 2 高アスペクト比エッチングパターンのキャピラリープレートによる模擬

これらの研究は、実物大または実物の AR ホール底部におけるイオンの挙動とチャージアップを示し、チャージアップに対する HAR ホール底部の性能に関する重要な情報を提供した。しかし、これまで、HAR ホールの底部と上部の電荷密度の絶対値を報告した研究はない。また、パルス駆動プラズマ中の HAR ホールの上部と下部の面電荷密度の時間変化についても絶対値としての定量的な報告例がない。

1.3 本研究の目的

前節までで述べたように、HAR エッチングにおけるホールパターン内部でのチャージアップに起因したエッチング速度の低下や形状異常が多く報告されているが、そのチャージ量は CP で模擬したホールパターン底部における電圧として評価されてきた。そのため、実際の面電荷がどの程度蓄積するか、またその蓄積と緩和の過程がどのようなになっているかは未だに解明されていない。

そのため本研究では、HAR ホールを CP ホールで模擬し、パターン底部へのチャージアップ機構を解析すると共に、実プロセスでレシピ検討に資するモデルを提供することを目的とした。

目的達成のために、次のようなアプローチをとる。実プロセスでも用いられている 40 MHz VHF のパルス駆動容量結合型プラズマ源を立ち上げ、CP 上部及び下部の面電荷密度の絶対値を評価する。面電荷密度の評価には、シース、ステージ絶縁用のアルミナ板の静電容量が必要であり、これらは CP と RF 電極の上下の peak-to-peak 電圧測定から実験的に評価する。実験で得られた静電容量を用いて、プラズマオン時とオフ時の電極電圧の平均値から面電荷密度の絶対値を等価回路と静電モデルから求める。本手法を用いて、アスペクト比を 12 から 100 まで変化させた CP 底面の電荷密度の時間依存性についての評価も行う。また、CP 底面電荷の充放電特性についても検討する。

1.4 本論文の構成

本論文は全6章から構成される。本章では、半導体デバイス、特にメモリについての概要とその製造の大きな要因のプラズマ源の概要、そしてプロセスにおける課題について述べた。

第2章では本研究のために立ち上げた二周波容量結合プラズマ源について述べる。まず、装置設計のために行った有限要素法ベースのプラズマ生成シミュレーションについて述べる。その結果を基に製作した本プラズマ装置で生成されたプラズマの基本パラメータや特徴についての評価も述べる。

第3章では本論文の要となるCP近傍の面電荷密度の評価方法について述べる。CPと電極を組み合わせた3タイプの設置方法における測定電圧を等価回路及び静電モデルに適用して評価を行う。

第4章では、第3章で述べた面電荷密度評価手法を用いて、パルスプラズマのパルスオン及びオフ切替え直前に注目し、CPのARやVHF電力、LF電力などをパラメータとして変化させた場合のCP底部電荷密度の評価と考察について述べる。

第5章ではCP底部で評価された電荷密度の時間変化に注目し、パルスオン時におけるチャージアップ電流やパルスオフ時におけるチャージ緩和機構について等価回路を基に検討した結果を述べる。

第6章は本論文の総括と今後の展望について述べる。

参考文献

- [1] キオクシアの研究・技術開発パンフレット(最終閲覧日 2020/12/22).
<https://about.kioxia.com/content/dam/kioxia/jp/ja-jp/about/about-us/rd/kioxia-technology-rd-j.pdf>
- [2] F. Masuoka, M. Momodomi, Y. Iwata, and R. Shiota: Tech. Dig. IEDM, (Washington, DC, USA, 1987), p.552.
- [3] Y. Fukuzumi, R. Katsumata, M. Kito, M. Kido, M Sato, H. Tanaka, Y. Nagata, Y. Matsuoka, Y. Iwata, H. Aichi, and A. Nitayama: Tech. Dig. IEDM, (Kyoto, Japan,2007), p.449.
- [4] 世界初, QLC 技術を用いた 3 次元フラッシュメモリ「BiCS FLASH™」の開発について(最終閲覧日 2020/12/22).
<https://about.kioxia.com/ja-jp/news/2017/20170628-2.html>
- [5] K. Ishimaru: Tech. Dig. IEDM, (San Francisco, CA, USA,2019), p.1.3.1.
- [6] 佐藤 淳一: よくわかる最新半導体プロセスの基本と仕組み[第3版](秀和システム, 2017).
- [7] 佐藤 淳一: よくわかる最新半導体製造装置の基本と仕組み[第3版](秀和システム, 2019) pp.117-119.
- [8] 野尻 一男: 現場の即戦力をはじめの半導体ドライエッチング技術,(技術評論社, 2012).
- [9] W. Tsai, G. Mueller, R. Lindquist, B. Frazier, and V. Vahedi: *J. Vac. Sci. Technol. B* **14** (1996) 3276.
- [10] T. Kitajima, Y. Takeo, Z. Lj. Petrović, and T. Makabe: *Appl. Phys. Lett.* **77** (2000) 489.
- [11] M. M. Turner and P. Chabert: *Phys. Rev. Lett.* **96** (2006) 205001.

- [12] J. Schulze, T. Gans, D. O'Connell, U. Czarnetzki, A. R. Ellingboe, and M. M. Turner: *J. Phys. D. Appl. Phys.* **40** (2007) 7008.
- [13] T. Shimada, T. Yagisawa, and T. Makabe: *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** (2006) 8876.
- [14] T. Makabe and T. Yagisawa: *Plasma Sources Sci. Technol.* **18** (2009) 014016.
- [15] 菅井 秀郎: プラズマエレクトロニクス, (オーム社, 2009).
- [16] 野尻 一男: Electronics Journal 90th Technical Symposium, (2004) p.89.
- [17] プラズマ・核融合学会 編 : プラズマプロセス技術, (森北出版株式会社, 2017) p.92.
- [18] S. A. Vitale and B. A. Smith: *J. Vac. Sci. Technol.*, B, **21**, (2003) 2205.
- [19] T. Ohchi et al.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47** (2008) 5324.
- [20] D.H. Meadows et al.: The Limits to Growth; a Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind, (Univierse Books, 1989).
- [21] K. Eriguchi and K. Ono: *J Phys. D*, **41** (2008) 024002.
- [22] K. P. Cheung: *Plasma Charging Damage*, (Springer 2001).
- [23] A. Cacciato, et al.: *Appl. Phys. Lett.*, (2002) 814464.
- [24] M. Okigawa, Y. Ishikawa, and S. Samukawa: *J. Vac. Sci. Technol. B*, **21** (2003) 2448.
- [25] S. Behera et al.: *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 034104.
- [26] H. F. Winters and J. W. Coburn: *Surf. Sci. Rep.*, **14** (1992), 161.
- [27] H. Jansen, H. Gardeniers, M. De Boer, M. Elwenspoek and J. Fluitman: *J. Micromech. Microeng.* **6** (1996) 14.
- [28] H. Abe, M. Yoneda, and N. Fujiwara: *Jpn. J. Appl. Phys.* **47** (2008) 1435.
- [29] B. Wu, A. Kumar, and S. Pamarthy: *J. Appl. Phys.* **108** (2010) 051101.
- [30] T. Iwase, Y. Kamaji, S. Y. Kang, K. Koga, N. Kuboi, M. Nakamura, N. Negishi, T. Nozaki, S. Nunomura, D. Ogawa, M. Omura, T. Shimizu, K. Shinoda, Y. Sonoda, H.

- Suzuki, K. Takahashi, T. Tsutsumi, K. Yoshikawa, T. Ishijima and K. Ishikawa: *Jpn. J. Appl. Phys.* **58** (2019) SE0802.
- [31] J. P. Gambino, S. A. Adderly, and J. U. Knickerbocker: *Microelectron. Eng.* **135** (2015) 73.
- [32] プラズマ・核融合学会 編 : プラズマプロセス技術, (森北出版株式会社, 2017) p.93.
- [33] N. Fujiwara, T. Maruyama, and M. Yoneda: *Jpn. J. Appl. Phys.* **34** (1995) 2095.
- [34] N. Fujiwara, T. Maruyama, and M. Yoneda: *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** (1996) 2450.
- [35] T. Kinoshita, M. Hane, and J. P. McVittie: *J. Vac. Sci. Technol.* **14** (1996) 560.
- [36] G. S. Hwang and K. P. Giapis: *J. Appl. Phys.* **81** (1997) 3433.
- [37] G. S. Hwang and K. P. Giapis: *J. Vac. Sci. Technol.* **15** (1997) 1741.
- [38] V. Ishchuk, B. E. Volland, M. Hauguth, M. Cooke, and I. W. Rangelow: *J. Appl. Phys.* **112** (2012) 084308.
- [39] K. Yonekura, M. Kiritani, S. Sakamori, T. Yokoi, N. Fujiwara, and H. Miyatake: *Jap. J. Appl. Phys.* **37** (1998) 2314.
- [40] T. Shimmura, S. Soda, S. Samukawa, M. Koyanagi, and K. Hane: *J. Vac. Sci. Technol.* **22** (2004) 533.
- [41] T. Shimmura, S. Soda, S. Samukawa, M. Koyanagi, and K. Hane: *J. Vac. Sci. Technol.* **20** (2002) 2346.
- [42] T. Shimmura, Y. Suzuki, S. Soda, S. Samukawa, M. Koyanagi, and K. Hane: *J. Vac. Sci. Technol.* **22** (2004) 433.
- [43] M. Watanabe, D. M. Shaw, and G. J. Collins: *Appl. Phys. Lett.* **79** (2001) 2698.
- [44] T. Shibayama, H. Shindo, and Y. Horiike: *Plasma Sources Sci. Technol.* **5** (1996) 254.
- [45] H. Ohtake and S. Samukawa: *J. Vac. Sci. Technol.* **20** (2002) 1026.

- [46] S. Samukawa and T. Mieno: *Plasma Sources Sci. Technol.* **5** (1996) 132.
- [47] C. J. Choi, O. S. Kwon, and Y. S. Seol: *Jpn. J. Appl. Phys.* **37** (1998) 6894.
- [48] J. H. Kim, C. J. Kang, T. H. Ahn, and J. T. Moon: *Thin Solid Films* **345** (1999) 124.
- [49] Capillary_TMCP1017J.pdf (最終閲覧日 2020/12/22)
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/Capillary_TMCP1017J.pdf
- [50] Y. Horiike, K. Kubota, H. Shindo, and T. Fukuzawa: *J. Vac. Sci. Technol. A* **13**(3), (1995) 801-809.
- [51] K. Kurihara and M. Sekine: *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** (2000) 1369.
- [52] K. Kurihara and M. Sekine: *Plasma. Sources Sci. Technol.* **5** (1996) 121-125.
- [53] M. Sekine: *Pure Appl. Chem.* **74**(3) (2002) 381-395.
- [54] S. Noda, N. Ozawa, T. Kinoshita, H. Tsuboi, K. Kawashima, Y. Hikosaka, K. Kinoshita and M. Sekine: *Thin Solid Films* **374** (2000) 181-189.
- [55] H. Ohtake, B. Jinnai, Y. Suzuki, S. Soda, T. Shimmura, and S. Samukawa: *J. Vac. Sci. Technol.* **24** (2006) 2172.
- [56] N. Negishi, M. Miyake, K. Yokogawa, M. Oyama, T. Kanekiyo, and M. Izawa: *J. Vac. Sci. Technol.* **35** (2017) 051205.

第2章 二周波プラズマ装置製作とプラズマ 特性評価

2.1 はじめに

本章では、エッチングプロセスに用いられる二周波重畳容量結合型プラズマ装置を模して本研究のために製作したプラズマ源について述べる。まず装置製作にあたり、生成されるプラズマの分布を予測するためにおこなった簡易なシミュレーションについて述べる。次に実際に製作した装置の概要を示し、最後に装置特性としてプラズマ診断をおこなった結果について述べる。

2.2 装置設計の指針としてのプラズマシミュレーション

プラズマ装置設計及び製作において、生成できるプラズマ特性をあらかじめ予測することは重要である。例えば、円筒形の容量結合型プラズマ装置では、電極間のギャップと各電極の側部にプラズマが生成される可能性があることは容易に推測できる。本実験装置ではプロセスで用いられるプラズマ装置の縮小版を想定しているため、電極間のギャップ内に放電を行うのが目標となる。同様に、電極側部への放電は、ギャップでのプラズマ密度やRF電極への自己バイアスに影響を与えかねないため、可能な限り抑制したいと考える。そのため、汎用物理シミュレーションソフトウェアCOMSOL®を用いて装置形状をもとにしたプラズマ生成シミュレーションをおこない、設計のためのプラズマ生成特性を簡易的に評価した。

本プラズマシミュレーションは流体モデルをベースとした有限要素法(Finite

Element Method : FEM)数値解析であり，粒子保存，運動量保存，エネルギー保存，電荷保存などを考慮して反復計算をおこない，プラズマ密度や電子温度などの安定解を求める。これらの基本方程式の詳細は付録 A で述べる。

図 2-1 にシミュレーションモデルを示す。本シミュレーションは軸対称の二次元円筒形モデルを採用しており，中心軸を赤の一点鎖線で示す。本装置では，直径 260 mm，高さ 150 mm の円筒空間に直径 114 mm の対向する二つの電極が 38 mm 隔てて設置されている。メッシュ部分はプラズマ生成空間を想定しており，ここでは電子密度，電子温度および電位分布などが算出される。中心軸付近上部の白い空間は接地電極であり，電位が 0 となるよう境界条件を設定している。一方，対向の空間は RF 電極を想定しており，ブロッキングキャパシタ想定した 1 mm 厚の絶縁体を介して，RF 振動が入力される。この RF 振動電圧は 40 MHz と 2 MHz の異なる周波数を重畳しており，peak-to-peak 電圧(V_{pp})はそれぞれ 300 V と 100 V とした。

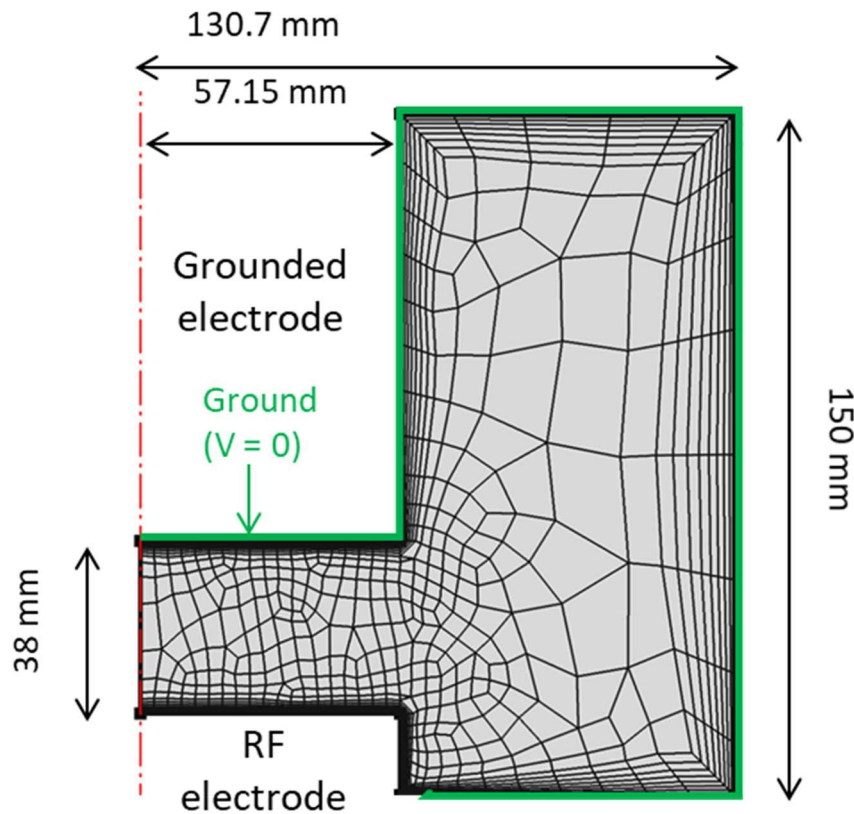


図 2-1 軸対称二次元容量結合プラズマシミュレーションモデル及び有限要素法 (Finite element method : FEM)メッシュ

本モデルを用いて、まず、RF 電極側部にシールドを設けることによる電子密度分布への影響を評価した結果を図 2-2 に示す。本結果より、最大電子密度はおよそ $2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ となっており、シールドなし(図 2-2 (a))ではプラズマはギャップの外側に噴き出す分布となっている。一方、シールドを設けた図 2-2 (b)の場合、最大電子密度はギャップ部に存在する。このことから、RF 電極側部は接地電位のシールドを設けるべきであることがわかった。

次に、各電極の側部の空間のサイズについて評価した結果を図 2-2 (c)に示す。電子密度の最大値はいずれも $2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 程度であるが、電極の外側空間を 7.5 cm から 3.4 cm に狭くした図 2-2 (c)では、より電極間ギャップでのプラズマ密度がより均一

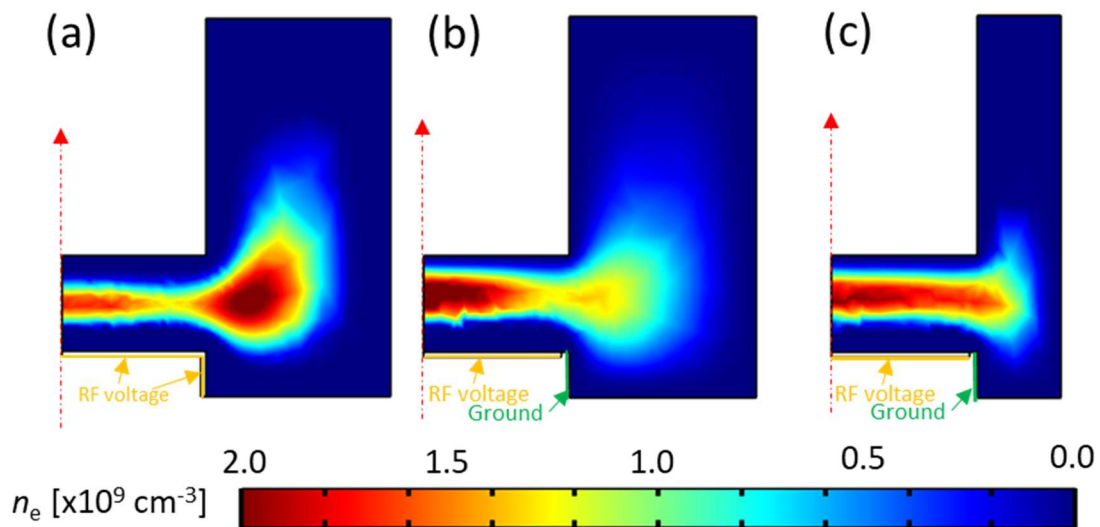


図 2-2 (a)RF 電極側部にシールドなし, (b)RF 電極側部にシールドあり, (c) RF 電極側部にシールドありかつ側部の空間を狭くした条件による電子密度の空間分布。

になっている。このことから、側壁の空間部分はより狭くするとプラズマはギャップ間で均一に生成できることが示された。

2.3 装置概要

本節では、シミュレーションで得られた知見を元に実際に製作した二周波容量結合プラズマ装置の概要について述べる。まず初めに、プラズマ生成部となる真空容器の概要と真空システム及び電源系について述べる。次に、キャピラリープレートが RF 電極上部に設置する方法について述べる。最後に、キャピラリープレート近傍の電圧を測定するのに重要となる高電圧プローブの周波数特性の較正について述べる。

2.3.1 装置構造

本実験を行うため図 2-3(a)に示す二周波重畳プラズマ源を立ち上げた。直径 16 cm、高さ 18 cm の真空容器をターボ分子ポンプ（公称排気速度：200 l/s）で排気し、

底部と上部に電極間距離 3 cm の同径 (11 cm) の接地電極(上部)と RF 電極(下部)をそれぞれ配置した。

上部の接地電極にはガスマニホールドが設置されており、放電ガス (Ar, O₂, C₄F₈) をマスフローコントローラを介して流量 30 sccm で容器内に導入する。圧力は静電容量マノメーターで測定し、ガス排気口のコンダクタンスバルブで制御した。

電源電極には CW またはパルス変調された 40 MHz (VHF)及び 2 MHz (LF)の高周波電源がそれぞれマッチングボックスを介して接続されている。印加電力はそれぞれ VHF ピークパワーが最大 600W, LF はピークパワーが最大 200 W である。パルス変調周波数は 1 kHz,パルスデューティー比は 50%としている。

また、側壁にはいくつかポートが設けられており、フィードスルーやプローブや四重極型質量分析器(Quadrupole mass analyzer : QMA)が取り付けられるようになっている。

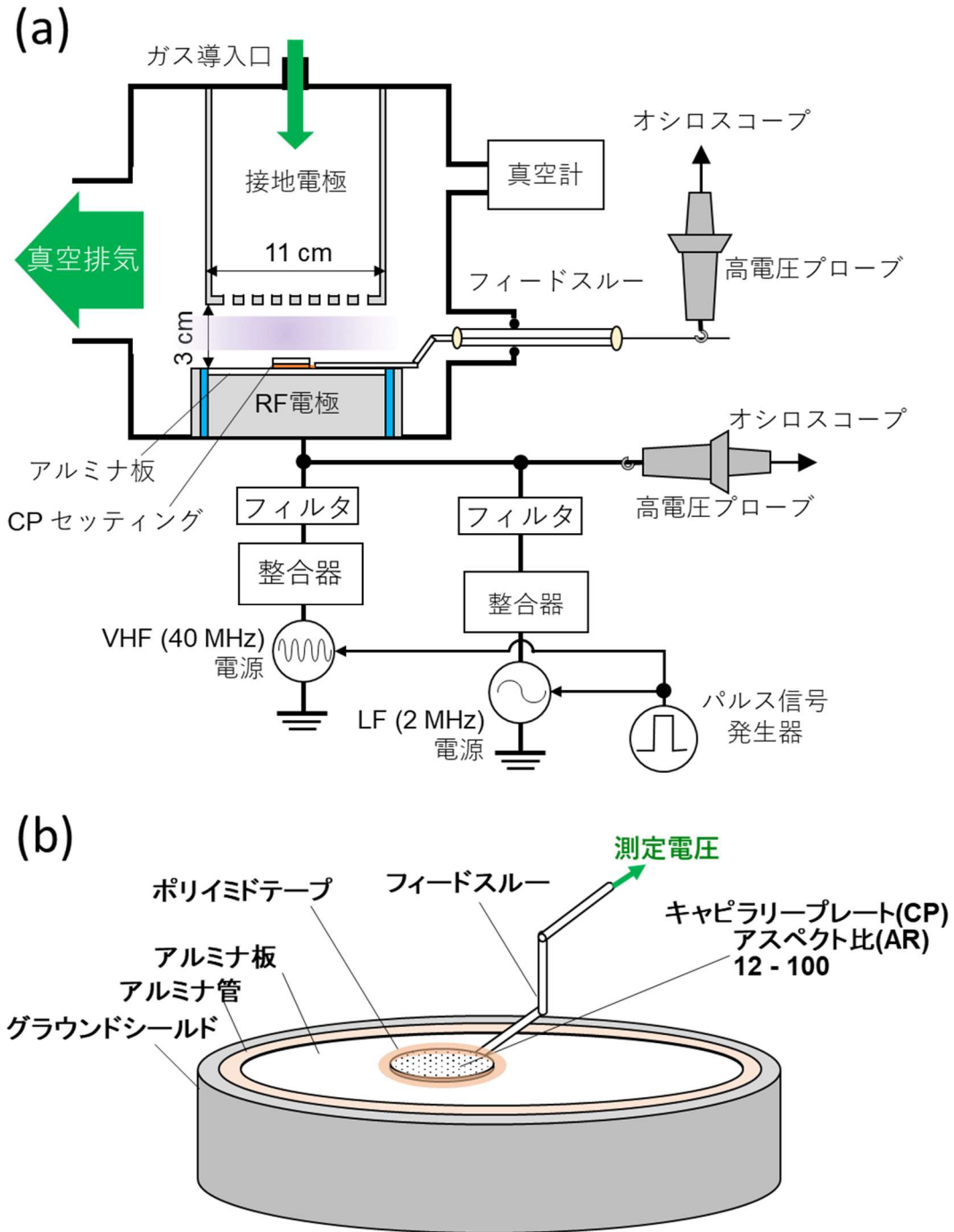


図 2-3 (a)二周波プラズマ装置概略図及び、(b)RF 電極上部ステージ詳細図

2.3.2 キャピラリープレート設置方法

HAR ホールのモデルとして CP を用い、CP の上部と下部の両方に電荷が蓄積する様子を調べる。本測定に用いた CP の基本仕様をまとめたものを図 2-4 及び表 2-1 に示す。Aspect Ratio(AR)=12-50 の CP は同じ直径、有効径、厚さ、開口率を持つため、形状による CP の静電容量と抵抗値は同様と考える。一方 AR = 75 および 100 の直径と有効径は AR = 12-50 のものと異なる。また AR = 75 と AR = 100 では厚さが異なる。

これらの CP を用いて、3 種類の CP セットアップを行った(図 2-5)。各セットアップはそれぞれ、CP 上部に CP と同じ直径のステンレスで作られた金属電極を設置した Type-1、CP 下部に金属電極を設置した Type-2 及び CP の上下に金属電極を設置した Type-3 があり、いずれも電源電極上にアルミナ板(直径 11 cm, 厚さ 0.5 mm)を取り付けた上に設置されている。

各セットアップにおいて VHF peak-to-peak 電圧 (V_{PP}) と VHF の発振成分を除去した平均電圧 (V_{AVE}) を測定する。CP の上部に現れる V_{PP} と V_{AVE} (自己バイアス電圧) を関連させるために Type-1 セットアップを用いた。同様に、CP ホール底部に現れる V_{PP} と V_{AVE} の評価には、Type-2 のセットアップを使用した。CP の静電容量評価のために測定した CP の上部と下部の V_{PP} の関係(第 3 章で詳述)は、金属電極を CP の上部と下部の両方に設置した Type-3 セットアップを用いて評価した。

金属電極の電圧は、真空封止と絶縁を施したフィードスルーを介して大気側にて高電圧プローブ(High voltage probe : HVP)により測定した。RF 電極の電圧は、別の HVP を使用して測定した。すべての HVP の周波数特性は、次に述べる方法にて真空フィードスルーの浮遊容量を考慮して慎重に較正した。

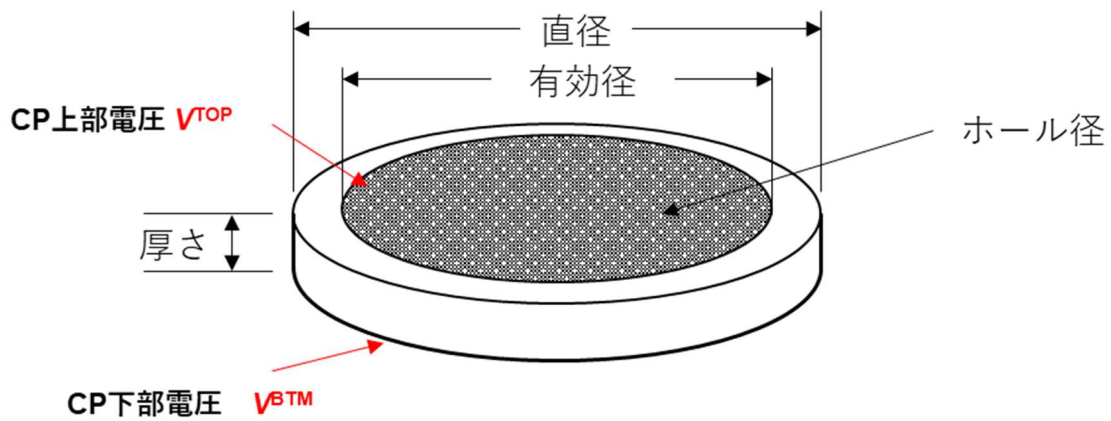


図 2-4 鉛ガラス製キャピラリープレート(CP)構造図

表 2-1 本研究で使したキャピラリープレート仕様一覧

アスペクト 比	直径 [mm]	有効径 [mm]	厚さ [mm]	ホール径 [mm]	開口率	CP 静電容量 [pF]
12	25	20	0.3	25	0.6	48
30	25	20	0.3	10	0.6	48
50	25	20	0.3	6	0.6	48
75	33	27	0.75	10	0.6	44
100	33	27	1	10	0.6	33

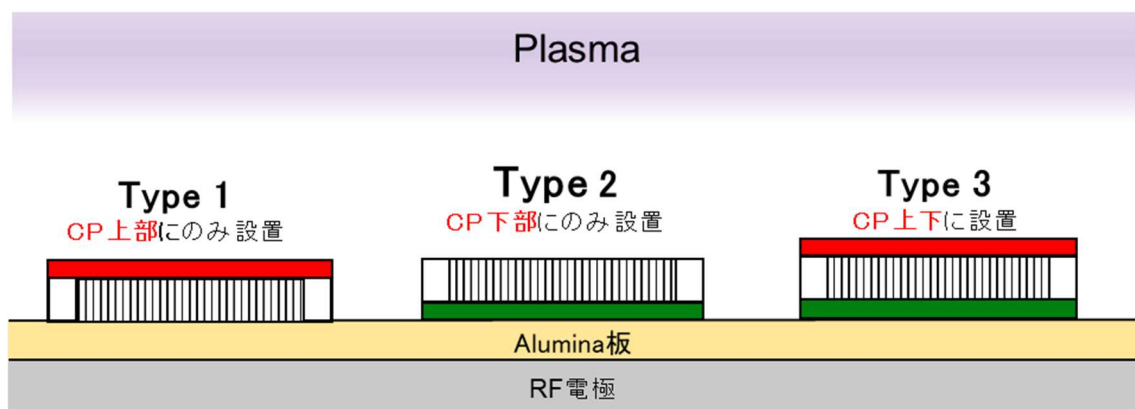


図 2-5 キャピラリープレート(CP)セットアップ, Type 1 : CP 上部にのみ測定電極設置, Type 2 : CP 下部にのみ測定電極設置, Type 3 : CP 上下に測定電極設置。

2.3.3 キャピラリープレート電圧測定用高電圧プローブの較正

CP 電圧の測定には、フィードスルーを含めたフラットな周波数特性が要求される。今回使用する高電圧プローブはテクトロニクス製の P6015A であり、公称の周波数特性は 75 MHz となっている。また入力抵抗と浮遊容量はそれぞれ 100 M Ω と 3 pF となっている[1][2]。しかし、本測定では、2.3.2 で述べたように、大気側と真空容器内はフィードスルーで接続されているため、フィードスルーの対接地浮遊容量を考慮する必要がある。そのため 1 kHz から 40 MHz までのフラットな周波数応答特性は、フィードスルー先端にファンクションジェネレータ(WF1973 : エヌエフ回路設計プロ

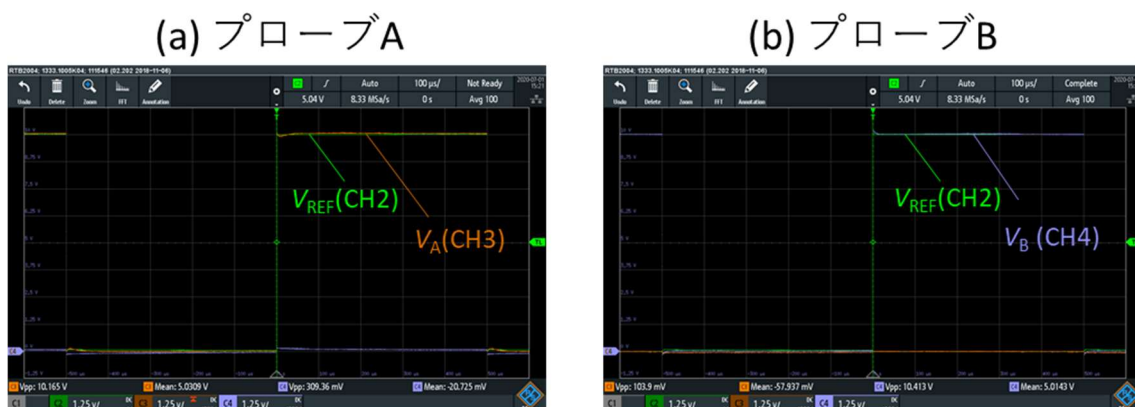


図 2-6 ファンクションジェネレータによるフィードスルーを含めた高電圧プローブの周波数特性の較正

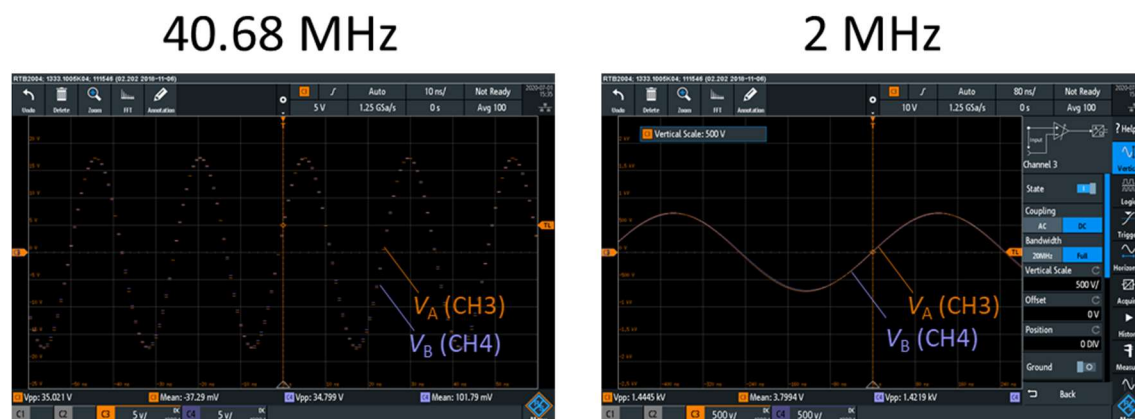


図 2-7 高周波電源周波数におけるフィードスルーを含めた高電圧プローブの振幅の較正

ック)からの信号を入力してチューニングを行った。

まず、1 kHz の $10\text{ V}_{0\text{-P}}$ パルス電圧信号を入力し低周波特性を得た波形を図 2-6 に示す。CH2 はファンクションジェネレータから直接信号を入力して、参考電圧 V_{REF} としている。(a)は CH3 に接続された高電圧プローブ-フィードスルーに信号を入力した場合であり、この時の CH3 における測定電圧を V_a とする。(b)は CH4 に接続された高電圧プローブ-フィードスルーに信号を入力した場合であり、この時の CH4 における測定電圧を V_b とする。チューニングにより良好な低周波数特性を得られたと言える。次に、2 MHz 及び 40.68 MHz の周波数特性を二つのフィードスルーセット間で差異が無いようにチューニングした波形を図 2-7 に示す。また、本実験では、二つの高電圧プローブ-フィードスルーのセットを用いて同時測定を行う。二つ以上の CP 電極電圧を測定する場合、各高電圧プローブ及びフィードスルー、さらにはオシロスコープの入力チャンネルは組み合わせ次第で周波数特性が変化することが考えられるため、較正時のこれらの組み合わせは変えないものとした。

2.4 装置の基本特性評価

本節では製作した装置の基本的なプラズマパラメータや RF 電極電圧について評価した結果について述べる。RF 電極に設置した高電圧プローブによる電圧測定はプローブに整合器が隣接することから、周波数特性に擾乱が加わることが考えられる。この影響については実際の測定をもとに評価する。次に基本プラズマ診断として、ラングミュアプローブと表面波プローブによる測定について述べる。特に表面波プローブについては、パルスプラズマにおける時間分解測定もおこない、 C_4F_8 添加 Ar プラズマと純 Ar プラズマの減衰特性の違いについて触れる。

2.4.1 高電圧プローブによる RF 電極電位測定

図 2-8 に高電圧プローブ(P6015A : テクトロニクス)を用いて測定した RF 電極電圧波形例を示す。なおこのときは RF 電極上には絶縁用のアルミナ板を設置していない。VHF 電力単周波(300 W)印加時は V_{PP} がおよそ 600 V であることがわかり、最大電位では約-100 V 程度となる。一方、LF 電力(100 W)重畳時は同程度の VHF 振幅に、2.6 kV 程度の V_{PP} を重ね合わせた波形となっている。

それぞれ、LF と VHF をすべて含めた V_{AVE} 、最大値、最小値をそれぞれ V_{AVE} 、 V_{max} 及び V_{min} としたとき、各電力の依存性は図 2-9 となる。 V_{AVE} 及び V_{PP} は VHF 電力、LF 電力それぞれの上昇に伴い、増加する傾向にあるが、特に LF 電力は V_{AVE} 及び V_{PP} に対して強い依存性があることがわかる。このことから、RF 電極上のバイアス電圧は LF 電力によって制御できることが示された。

VHF 電力依存性において、電位の最大値が 0 V を超えておらずプラズマの基本物理現象と矛盾しているように見えるが、これは電極電圧を測定している場所が整合器の出力端となるため、VHF 高周波において RF 電極位置における周波数特性異なるこ

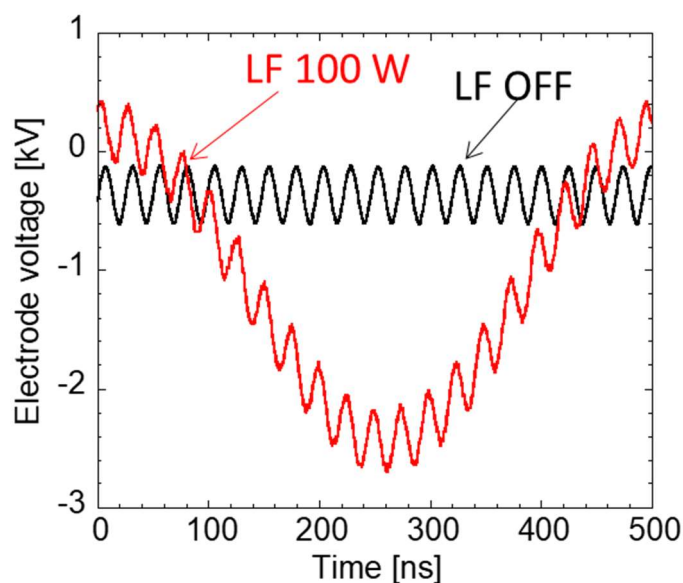


図 2-8 RF 電極における高電圧プローブの測定電圧波形例

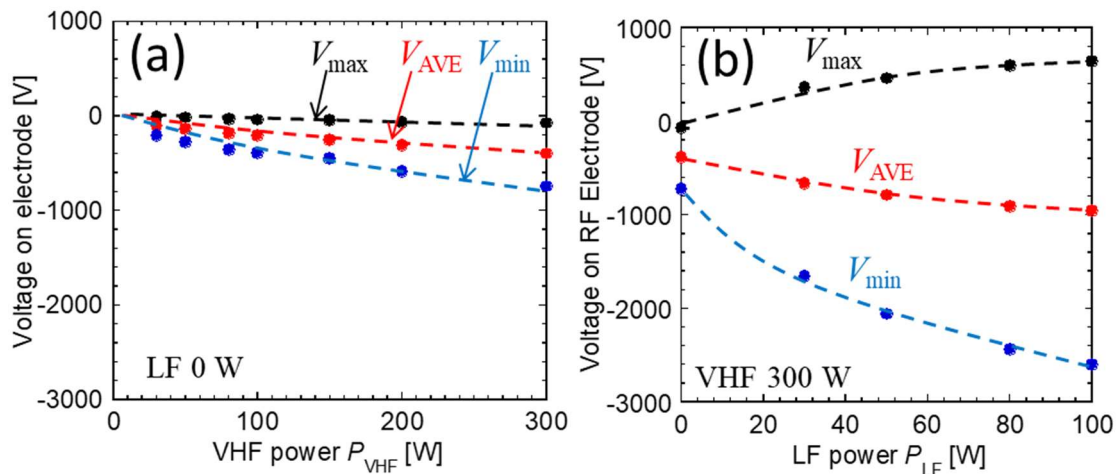


図 2-9 RF 電極における最大電圧(V_{max}), 最小電圧(V_{min})及び平均電圧(V_{AVE})の, (a)VHF 電力依存性及び(b)LF 電力依存性

とが原因である。実際に、周波数特性の較正の際、LF の正弦波入力ではファンクションジェネレータの出力電圧と測定電圧は一致するが、VHF の正弦波信号入力では測定電圧はファンクションジェネレータの出力電圧の半分程度となることを確認している。以降、RF 電極における V_{pp} は、この減衰分を補正するために 2 倍した値を使用する。

2.4.2 ラングミュアプローブ法

プラズマパラメータ (プラズマ密度, 電子温度, プラズマ電位) は、図 2-10 に示す。RF 補償型ラングミュアプローブ (先端径 0.3 mm, 先端長 5 mm) を用いて測定した。プローブは容器の側壁から挿入し、半径方向と軸方向の双方に対して放電領域の中心になるように設置した。

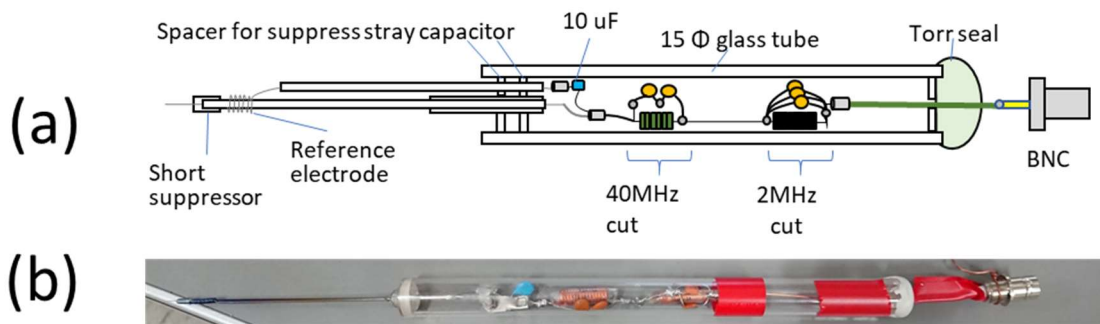


図 2-10 (a)RF 補償型ラングミュアプローブの構造及び、(b)実際のプローブの写真

ラングミュアプローブ測定では、しばしば RF 電力によるプラズマ電位振動がプラズマとプローブ先端間のシース電圧の変動を引き起こし、結果を不正確にする。そのためシース電圧振動を抑制することが正確な測定を行うために重要である[3]-[5]。このシース電圧の変動を抑えるために、プローブ先端近傍に共振周波数 40 MHz 及び 2 MHz の LC タンク回路を設置した。この LC タンク回路の周波数に対する透過特性をネットワークアナライザで測定した結果を図 2-11 に示す。透過特性は 2 MHz 近傍のナローピークと 44 MHz を中心としたワイドピークを持つ。2 MHz と 40.68 MHz



図 2-11 RF 補償ラングミュアプローブの周波数透過特性

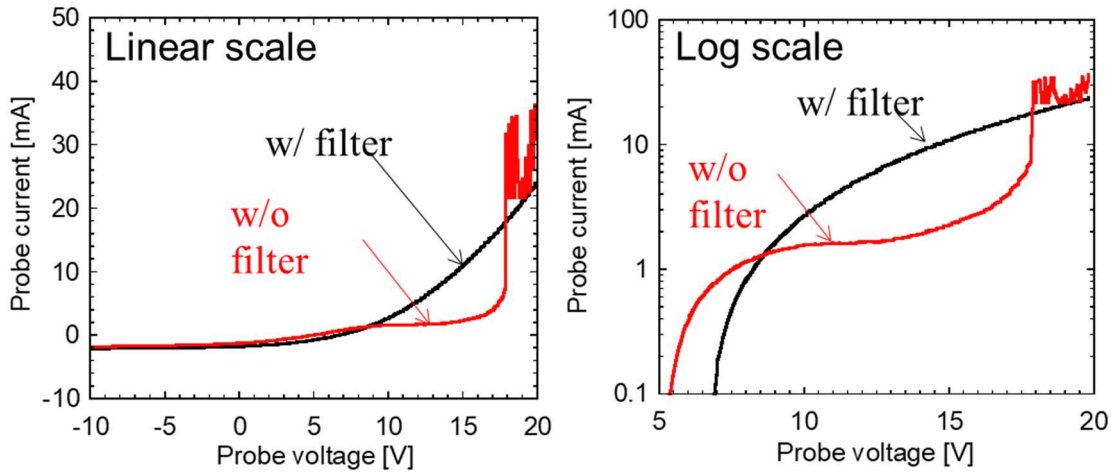


図 2-1 2 RF 補償及び非補償ラングミュアプローブによるプラズマ V-I 特性

の透過特性はそれぞれ-25.1 dB と-32.6 dB となった。さらに、プローブにコンデンサを介して接続した金属線を絶縁セラミック管に巻き、プローブ先端部のプラズマ電位変動への追従性を向上させた。

図 2-1 2 プローブ測定における RF 補償フィルタの有無に対する V-I 特性の違い例を示す。フィルタ回路がない場合、イオン飽和電流はおよそ妥当な測定ができているが、電子飽和電流領域について、測定値が不安定になる現象がみられる。一方、フィルタ回路を用いた測定結果はプローブ電圧が 20 V までなめらかな曲線を描くこと

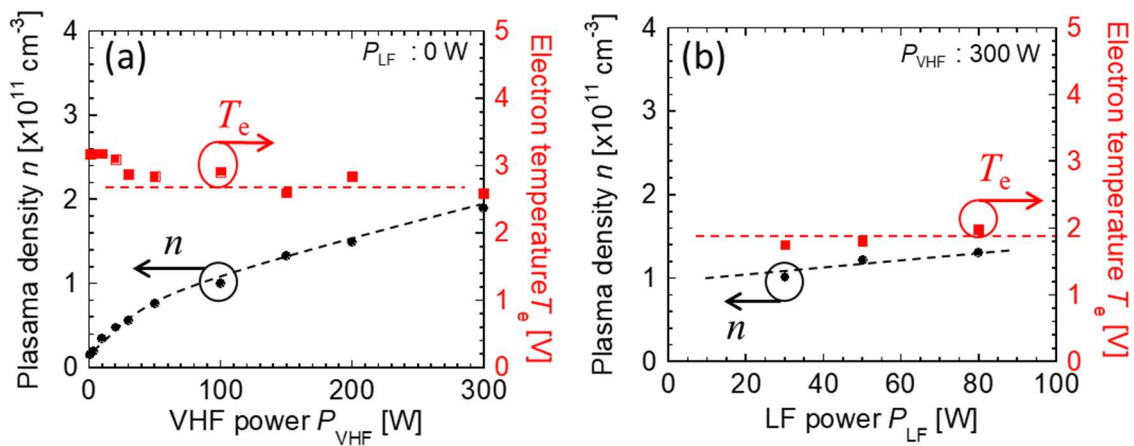


図 2-1 3 RF 補償ラングミュアプローブによるプラズマ密度及び電子温度の VHF 及び LF 電力依存性

がわかる。このことから、製作したフィルタ回路によるシース振動抑制はラングミュアプローブ測定において、良好な測定結果を得るのに有効であることが確認できた。

図 2-1 3(a)に Ar 圧力 4.0 Pa におけるプラズマ密度(n),電子温度(T_e)の連続波(CW)における VHF 電力依存性を示す。プラズマ密度は VHF 出力とともに単調に増加し、300 W の VHF 印加電力では $n \sim 2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ であった。電子温度は VHF 出力に対してほぼ一定($T_e \sim 3.0 \text{ eV}$)であった。

図 2-1 3(b)は(a)と同様に圧力 4.0 Pa におけるプラズマ密度(n),電子温度(T_e)の CW における LF 電力依存性を示す。このとき VHF 電力は 300 W としている。LF 電力の増加に伴い n は僅かに増加し、およそ $n \sim 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ であった。 T_e はほぼ一定($T_e \sim 3.0 \text{ eV}$)である。

図 2-1 4に Ar 圧力 4.0 Pa におけるプラズマ電位(V_p)及び浮遊電位(V_f)の(a)VHF 電力依存性及び(b)LF 電力依存性を示す。 V_p 及び V_f は VHF 電力及び LF 電力に対してほぼ一定($V_p \sim 21 \text{ V}$, $V_f \sim 11 \text{ V}$)であった。

図 2-1 5に VHF 電力 300 W, LF 電力 0 W の CW プラズマにおける(a)プラズマ密度, (b)電子温度及び(c)プラズマ電位の Ar ガス圧力依存性を示す。プラズマ密度は圧力に対して単調増加し、 $\sim 7 \text{ Pa}$ で $2.3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ に達する。電子温度は圧力の増加と共

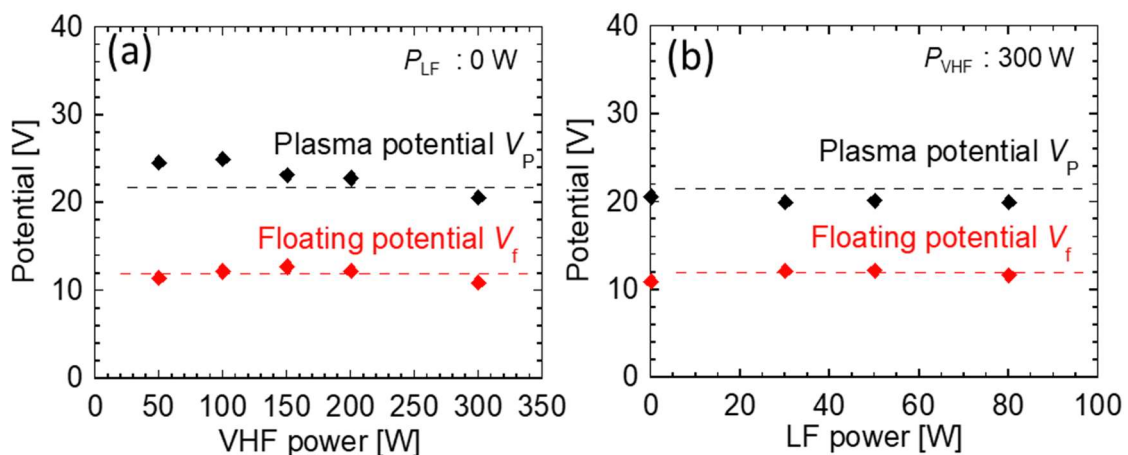


図 2-1 4 RF 補償ラングミュアプローブによる浮遊電位およびプラズマ電位評価

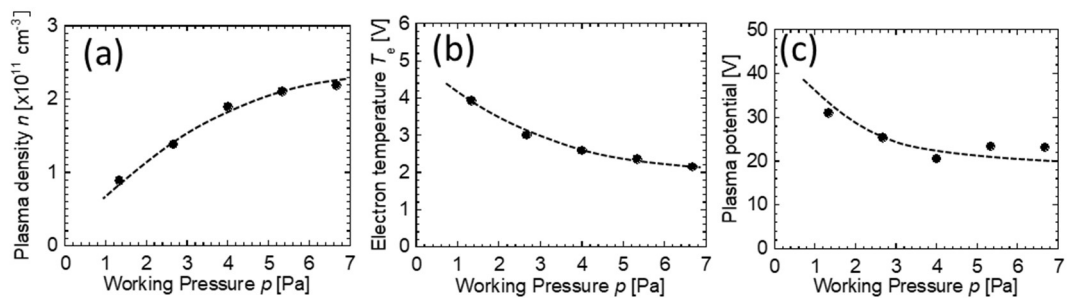


図 2-15 RF 補償ラングミュアプローブによるプラズマ密度，電子温度，プラズマ電位のガス圧力依存性(VHF 電力 300 W, LF 0W)

に減少していく傾向となり， ~ 1 Pa では ~ 4 eV， ~ 7 Pa で ~ 2 eV となる。グローバルモデルにおける粒子のエネルギーを考えると，同様のプラズマサイズにおいて電子温度はガス密度の増加と共に減少する傾向となる[6]ため，本結果は妥当であると考えられる。プラズマ電位も T_e と同様に圧力の増加と共に減少していく傾向となり，2 Pa において ~ 30 V となる。

一方，プラズマ密度，電子温度，プラズマ電位の径方向分布を図 2-16 に示す。プラズマ密度は LF 電力印加によって減少する傾向にあるが，中心からの減衰は LF 電力の有無にかかわらず同様の傾向を示す。また，RF 端部でのプラズマ密度は中心

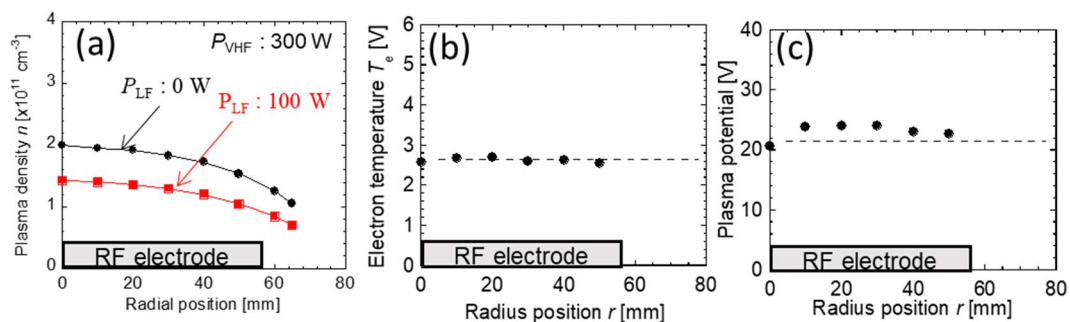


図 2-16 RF 補償ラングミュアプローブによるプラズマ密度，電子温度，プラズマ電位の径方向分布測定(VHF 電力 300 W, 4 Pa)

の約 80%程度であり、およそ均一であることがわかる。また電子温度とプラズマ電位は VHF 単周波の場合のみ記載しているが、ともに径方向に対して RF 電極上でほぼ均一($T_e \sim 2.7$ eV, $V_p \sim 21$ V)であることがわかった。

2.4.3 表面波プローブ法

ラングミュアプローブとは異なる電子密度の評価手法として表面波プローブがある。これは、真空封止を施した誘電体内部にアンテナを挿入し、マイクロ波を誘電体表面に励起することで、表面共振周波数から電子密度を逆算する手法である(図 2-17) [7]。表面共振周波数 ω_{SW} は電子プラズマ周波数 ω_p と誘電体の比誘電率 ϵ_d を用いて次の式で表される。

$$\frac{\omega_{SW}}{\omega_p} = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon_d}} \quad (2.1)$$

また、電子プラズマ周波数 ω_p は以下の式で表される。

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} \propto \sqrt{n_e} \quad (2.2)$$

実用的には、プラズマ角周波数の定数をまとめて以下の式で電子密度 n_e を評価できる。

$$n_e \sim 0.0124 f_{sw}^2 (1 + \epsilon_d) [\text{m}^{-3}] \quad (2.3)$$

表面波プローブの特徴としてラングミュアプローブのような、プラズマから電極により直接電流を測定する必要がないため、絶縁物質等の堆積による擾乱を引き起こしにくいことが挙げられる。

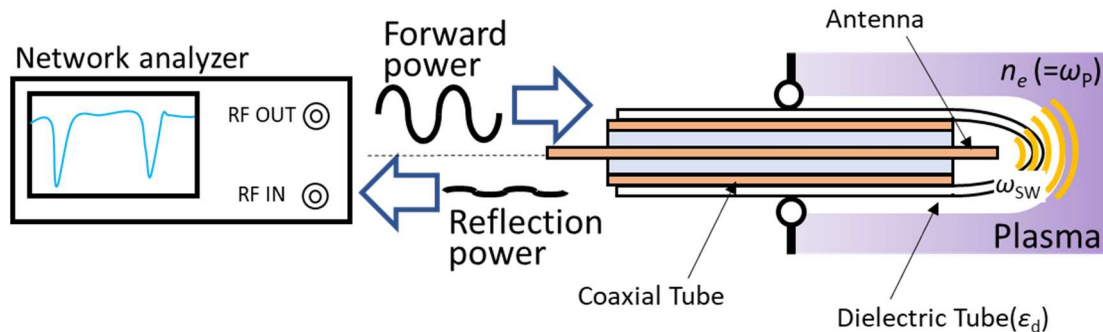


図 2-17 表面波プローブの構造図[7]

表面波プローブによる電子密度測定においては、励起するマイクロ波と反射したマイクロ波の違い(プラズマによる励起マイクロ波のエネルギー吸収)をもとに電子密度を評価することから、測定においてはネットワークアナライザが主に用いられる。ネットワークアナライザは、マイクロ波発信器と方向性結合器、マイクロ波受信器がセットになった測定器であり、反射波強度測定や透過特性評価、位相評価をマイクロ波の周波数を掃引させて評価できる。

本研究における表面波プローブを用いた電子密度評価においては、電子密度の時間分解測定も視野に入れ、ネットワークアナライザと同等の機能を持ち、かつ時間分解ができる測定系を構築した(図 2-18)。この測定系は、時間分解能が $1\ \mu\text{s}$ 程度のゼロスパンモード(周波数を固定したモード)が扱えるスペクトラムアナライザ(RSA3030-TG: RIGOL)を軸に、発振器となるトラッキングジェネレータと方向性結合器として働く RF ブリッジ (86205A: Agilent Technology)を組み合わせている。スペクトラムアナライザのゼロスパンモードは、発振周波数を掃引せず固定するものであり、

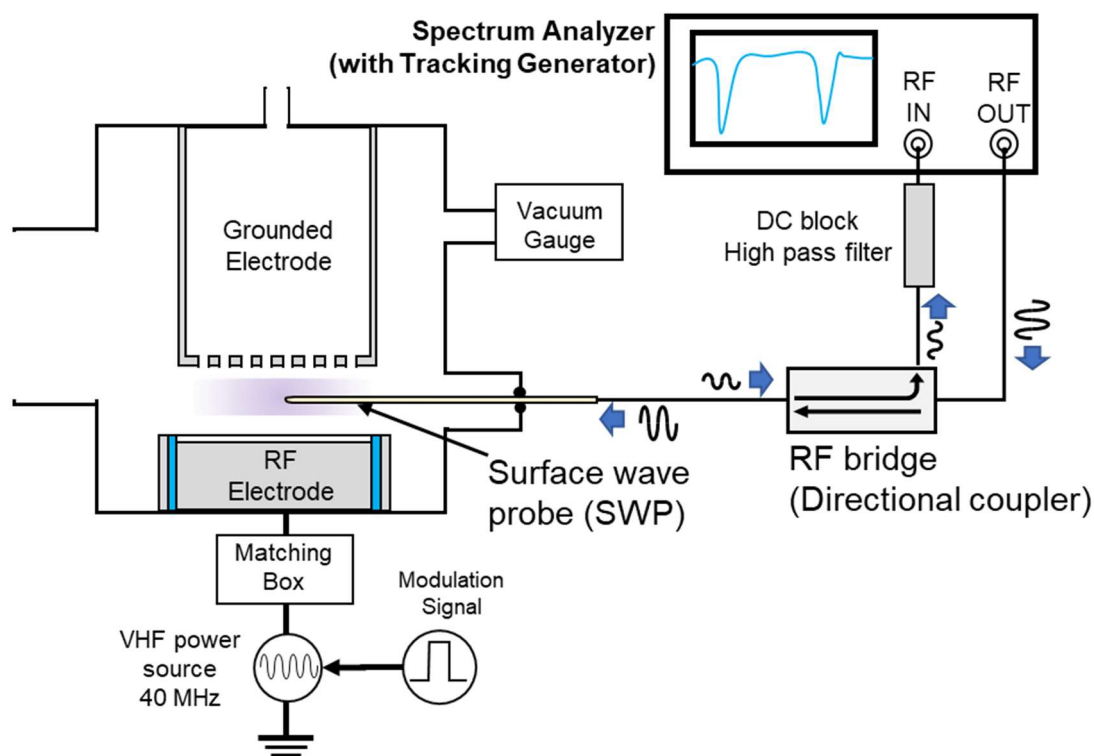


図 2-18 表面波プローブ測定システム

吸収スペクトルを時系列として評価することができる。図 2-19 に示すように、周波数を変化させながら共振点を評価することで、時間と周波数に対する吸収強度の二次元マッピングを作り、ここから、ある時刻における共振周波数を評価することができる。

図 2-20 に CW における純 Ar 及び C_4F_8 添加プラズマの電子密度の VHF 電力依存性を示す。ガス圧力は 2 Pa としており、 C_4F_8 添加プラズマでは C_4F_8 を 27%、 O_2 を 13% それぞれ混合した Ar ガスを用いている。純 Ar、 C_4F_8 添加プラズマ共に VHF 電力に対して単調増加する傾向をもち、 C_4F_8 添加プラズマは純 Ar プラズマより、電子密度が低い傾向にある。純 Ar プラズマは 300W で、約 10^{11} cm^{-3} 程度の電子密度であることから、ラングミュアプローブの結果(図 2-13 参照)とオーダーで一致する。

次に Ar および Ar/ C_4F_8 / O_2 パルスプラズマ(圧力 2 Pa, C_4F_8 / O_2 混合比 27%/13%, ピ

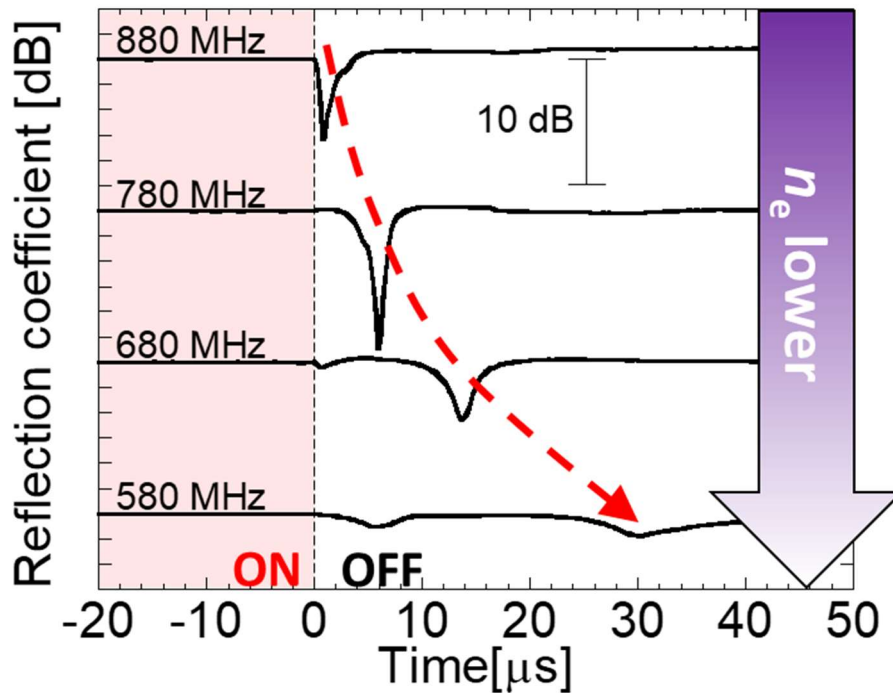


図 2-19 スペクトラムアナライザのゼロスパンモードによる電子密度時間分解測定の例

ーク電力 200 W, パルス周波数 1 kHz, パルスデューティ比 50%)における電子密度の時間変化評価の結果を図 2-2 1 に示す。ここで横軸はパルス OFF 開始を $t = 0$ としている。純 Ar プラズマにおいて電子密度は二段階の減衰がみられる。一方 C_4F_8/O_2 添加 Ar プラズマでは単調に減衰する。

純 Ar プラズマについて, 電子密度を VHF 電力 OFF 直後の値で規格化し, 片対数プロットしたものを図 2-2 2 に示す。VHF 電力 OFF 直後の早い減衰時定数は約 26 μs である。一方その後の緩やかな減衰について, 指数関数フィッティングをすると 132 μs の時定数が得られる。両者の減衰時定数の違いは, 電子温度の減衰による両極性拡散係数の変化であると考えられる[8]。両極性拡散係数(D_a)及び拡散時定数(τ)は次の式で求めることができる。

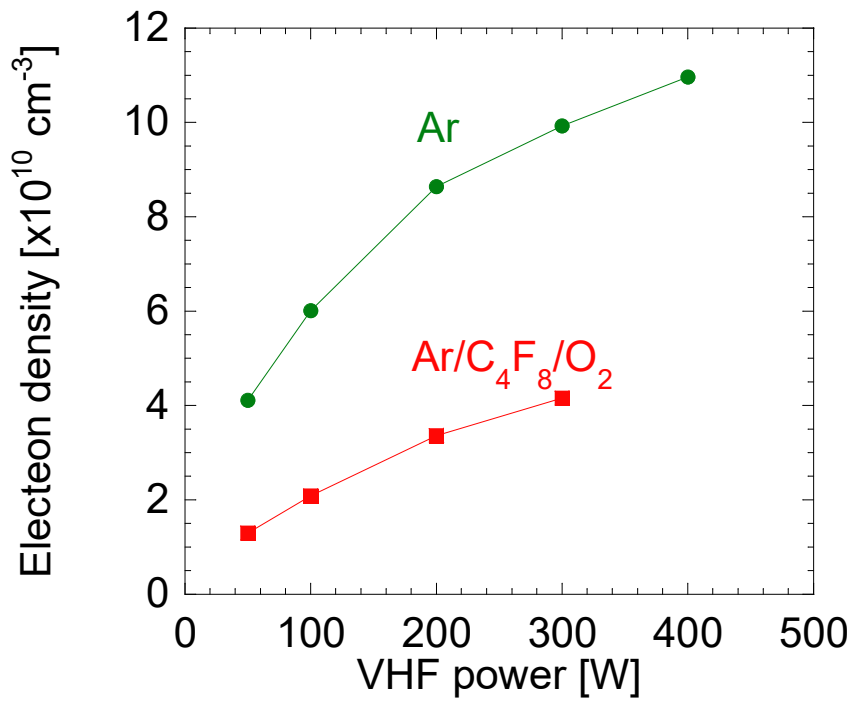


図 2-20 CW 放電における表面波プローブを用いた電子密度の VHF 電力依存性

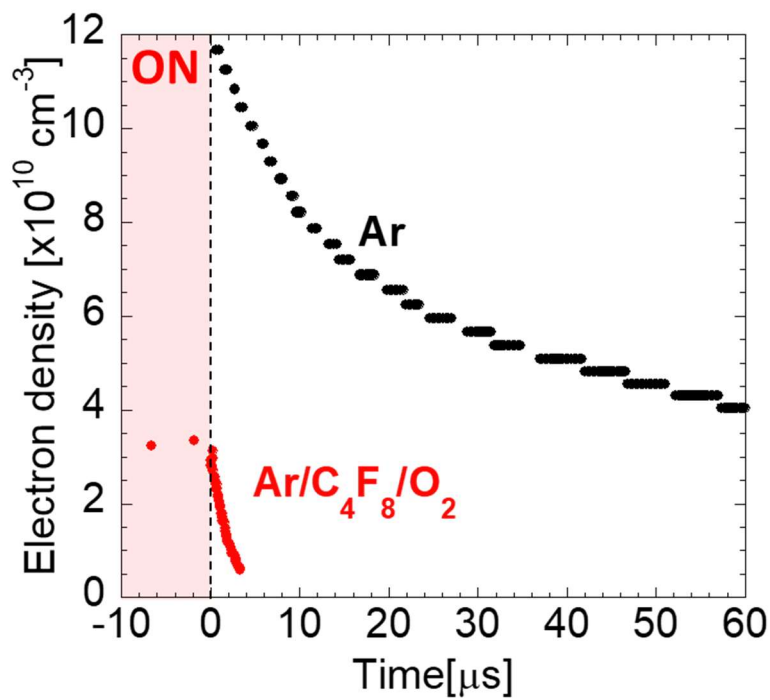


図 2-21 電子密度時間分解測定結果(VHF 電力 200 W)

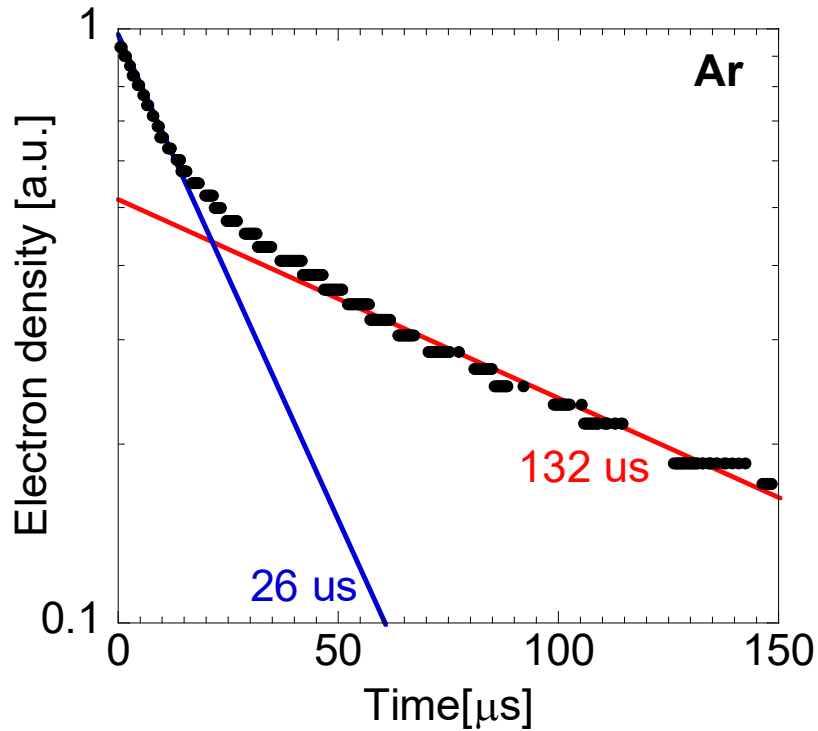


図 2-2 2 Ar プラズマにおける規格化電子密度の減衰時定数評価(VHF 電力 200 W)

$$\tau = \frac{L^2}{D_a} \quad (2.4)$$

$$D_a \approx \mu_i \frac{k_B T_e}{e} \quad (T_e \gg T_i) \quad (2.5)$$

$$\mu_i = \frac{e}{m_i \nu_i} \quad (2.6)$$

L はプラズマの代表的な大きさを表すが、ここでは電極間距離と仮定する。また、中性粒子温度 T_n 及びイオン温度 T_i はそれぞれ 0.060 eV と仮定する。VHF 電力 OFF 直後は電子温度が高いと仮定して $T_e = 2.5$ eV とすると時定数は 6 μs 程度になり、実験の早い時定数と矛盾するが、これはこの時間スケール内において電子温度が急激に減衰することに起因すると考えられる。例えば、電子のエネルギー緩和時間内(~10 μs) で時間平均した電子温度を $T_e = 0.60$ eV とすると時定数は約 25 μs となりおよその一

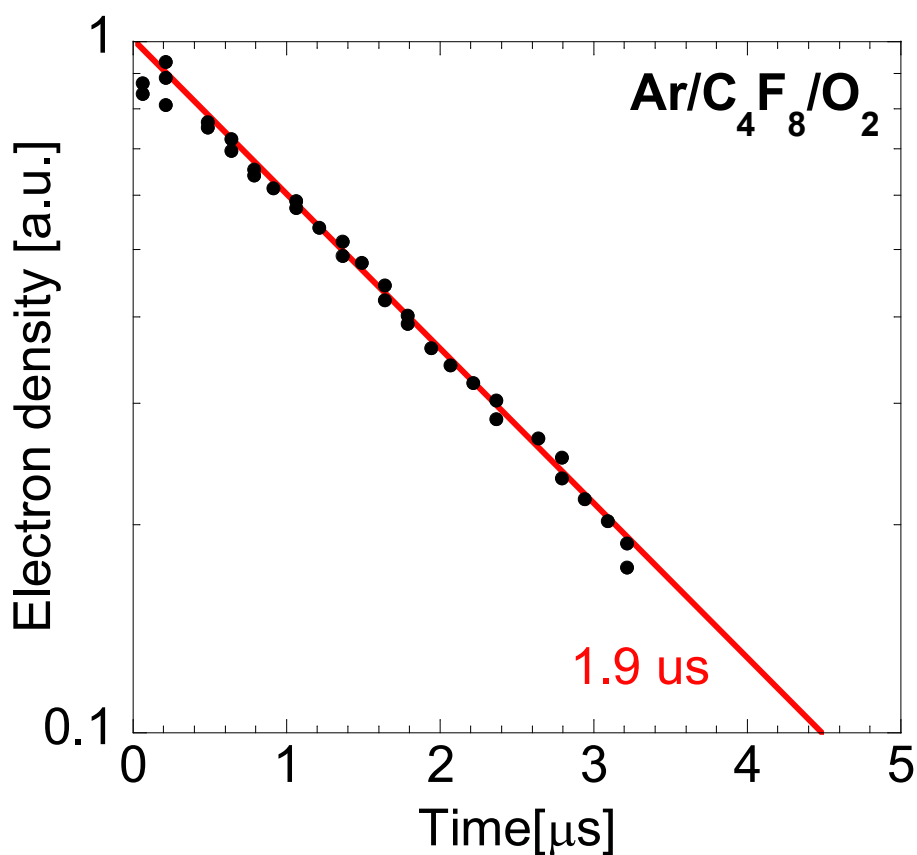


図 2-23 C₄F₈ プラズマにおける規格化電子密度の減衰時定数評価(VHF 電力 200 W)

致が見られる。一方、緩やかな減衰($t > 50 \mu\text{s}$)は電子温度が十分に減衰し、中性粒子及びイオン温度と同程度と考え、 $T_e = 0.060 \text{ eV}$ とすると時定数は $140 \mu\text{s}$ となり、これもおよそ実験と一致する。以上のことから、この電子密度の減衰は両極性拡散でおよそ説明できることがわかった。

一方、C₄F₈ 添加プラズマの減衰を VHF 電力 OFF 直後の電子密度で規格化し、片対数プロットしたものを図 2-23 に示す。先に述べたように、この減衰は単純な指数関数となる。この減衰を指数関数でフィッティングすると、時定数は約 $1.9 \mu\text{s}$ となり、純 Ar プラズマと比較すると極めて短い時定数であることがわかる。これは、電気負性ガスである C₄F₈ に関わる粒子種(F 原子, CF_x ラジカル等)への電子付着により負イ

オンを形成するためと考えられる。この電子付着反応を簡易的に反応速度定数(k_{at})と各粒子密度($n_e, n_{C_xF_y}$)から次の式で評価する。

$$\frac{dn_e}{dt} = -k_{at}n_en_{C_xF_y} \quad (2.7)$$

この式における時定数は

$$\tau = \frac{1}{k_{at}n_{C_xF_y}} \quad (2.8)$$

となる。例として、 $C_4F_8 + e^- \rightarrow C_4F_8^-$ の反応に注目して Choristophorou らの推奨する電子付着係数を用いて $T_e = 0.060$ eV, $k_{at} = 2.08 \times 10^{-8}$ cm³/s とする[9]。C₄F₈ の数密度 $n_{C_4F_8}$ はガス圧力と流量比(27%)を用いておよそ 5×10^{13} cm⁻³ と算出でき、この時の時定数は 0.86 μs となり、実測値と近い値を示した。一方、両極性拡散に起因する電子密度減衰の時定数は電子温度、ガス温度、イオン温度すべてを 0.060 eV とし、Ar, O₂, C₄F₈ の質量数を簡単のためすべて 0.040 kg/mol と仮定すると電子と正イオンによる両極性拡散による減衰時定数は約 140 μs となり電子付着による減衰が圧倒的に早いことがわかる。以上のことから、C₄F₈ 添加プラズマで電子密度減衰時定数が短くなる原因は電子付着によるものが大きいと考えられる。

最後に、各電子密度の時系列解析において、圧力を 0.7 Pa へと変化させた条件による結果を図 2-25 に示す。純 Ar プラズマでは圧力 0.7 Pa では減衰時定数が約 35 μs と減少している。これは、ガス圧力 0.7 Pa における両極性拡散の減衰時定数を計算すると 47 μs となりおおよそ一致するため、圧力の低下に伴い衝突周波数が低下したことによるものといえる。一方、C₄F₈ 添加プラズマでは、図 2-24 に示すように減衰時定数が約 3.0 μs と遅くなっているが、これは C₄F₈ の密度が低下し電子付着レートが低下したためと考えられる。例えば、ガス圧力が 0.7 Pa の場合、C₄F₈ の数密度 $n_{C_4F_8}$ はガス圧力と流量比(27%)を用いておよそ 2×10^{13} cm⁻³ となり、この時の電子密度の減衰時定数は 2.4 μs 程度と算出でき実験値と大よそ一致する。以上より、電子密度は Ar

プラズマでは両極性拡散で減衰し、 C_4F_8 プラズマでは電気負性ガスへの電子付着により減衰することがわかる。

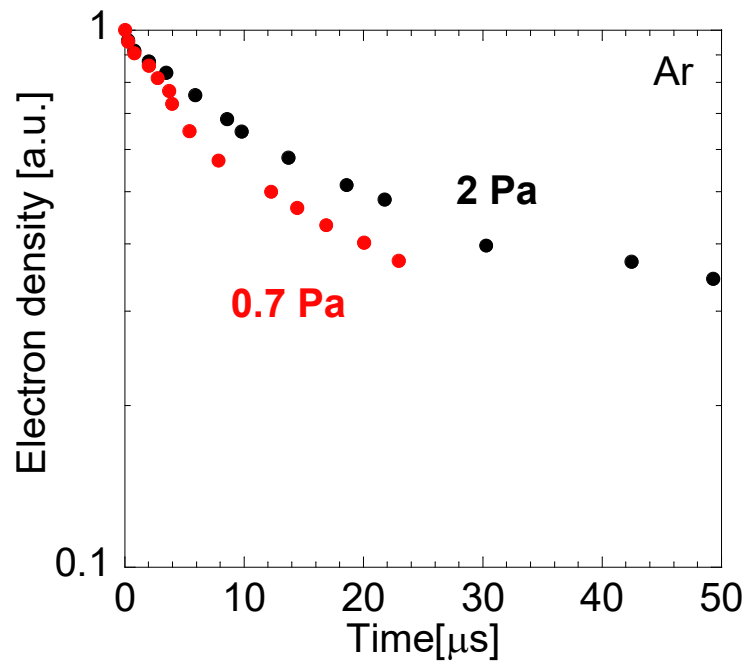


図 2-2 5 Ar プラズマにおける規格化電子密度減衰の圧力依存性(VHF 電力 200 W)

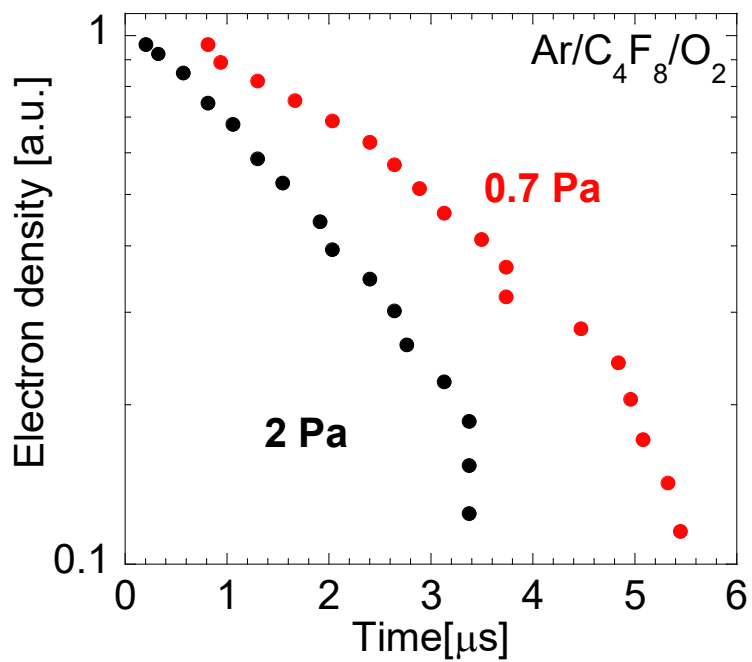


図 2-2 4 C_4F_8 プラズマにおける規格化電子密度減衰の圧力依存性(VHF 電力 200W)

2.4.4 キャピラリープレート抵抗の測定

本研究において CP の抵抗値は最も重要なパラメータの一つである。ここでは、CP 抵抗値の簡易的測定について述べる。本測定では、図 2-26(a)に示すように CP と同径のステンレス電極で CP (AR = 50, 直径 25 mm, 厚さ 0.3 mm) を挟み込み、その電極にデジタル絶縁抵抗計 (IR4053 : HIOKI) を取り付けて測定をおこなった。印加電圧 1 kV である。また、SUS 電極の片側には絶縁用のセラミック管を介して熱電対が取り付けられており、CP の温度を簡易的に測定できる構造となっている。

図 2-26(a)に示す測定系を用いて、ドライヤーで加熱しながら CP 抵抗を測定した結果をアレニウスプロットとして図 2-26(b)に示す。CP の抵抗値は温度の逆数に対し指数関数的に増加しているのがわかる。本測定では温度の範囲が狭いが、CP の伝導電流が誘電体におけるホッピング電流[10][11]であると考えられることから、この結果を外挿することができる。外挿値から、例えば 74 °C (347 K) における CP 抵抗は 300 M Ω 程度となる。これは電圧測定に用いる高電圧プローブの入力抵抗 (100 M Ω) に匹敵する。

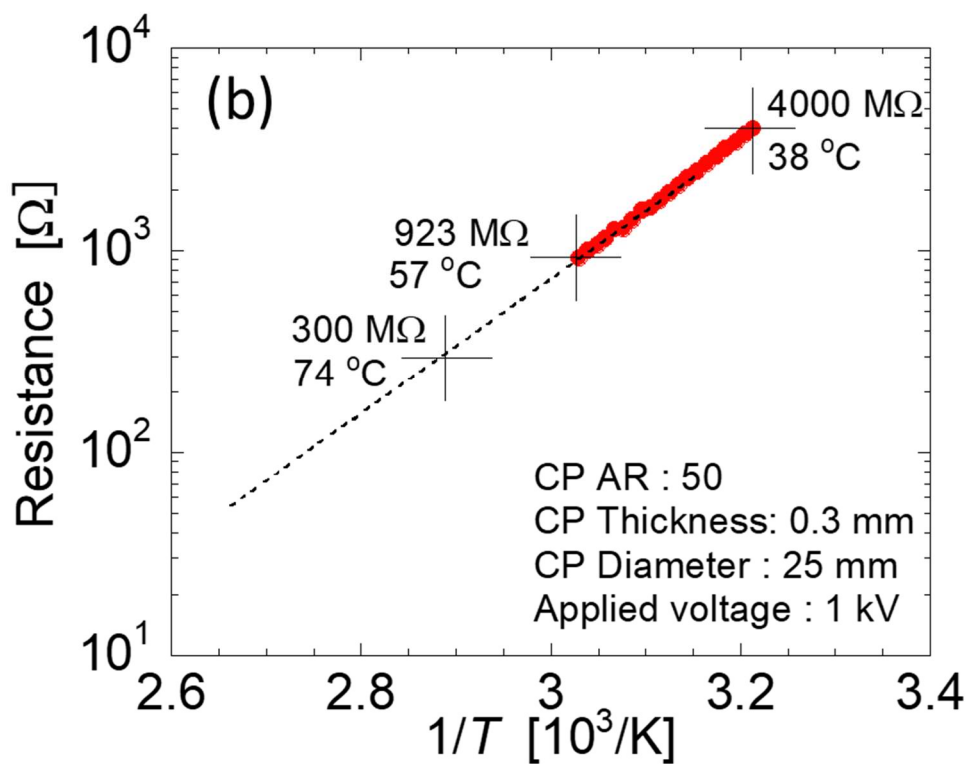
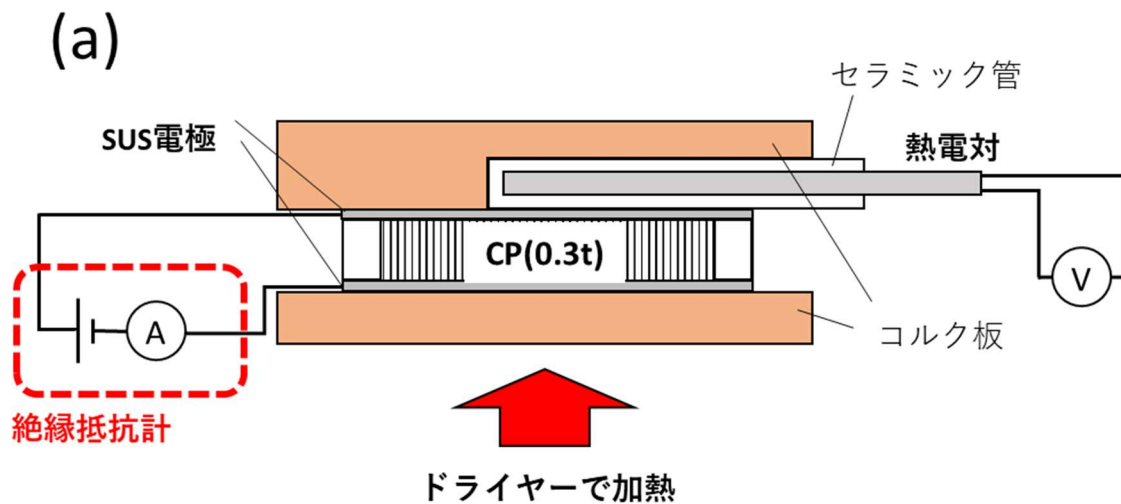


図 2-2 6 (a)絶縁抵抗計による CP 抵抗温度依存性測定系及び(b)測定結果

2.5 まとめ

本章では、本研究のために立ち上げたエッチングプロセスで使用される装置を模したパルス制御可能な二周波重畳容量結合プラズマ源の概要とその装置で生成されたプラズマの基本特性について述べた。まず設計指針を得るため簡易的な有限要素法に基づいたプラズマ生成シミュレーションを行った。シミュレーションの結果、容量結合型プラズマ源において、電力を印加する RF 電極の側面に RF シールドを設置し、電極と側壁の間の空間を抑制することがプラズマの閉じ込めに有効であることが解った。この設計指針に基づいて製作された装置は直径 11 cm、電極間距離が 3 cm の狭ギャップ容量結合型プラズマ源である。このプラズマ源は実プロセスで用いられるプラズマ源を模しており、超高周波(40 MHz)電力と低周波(2 MHz)電力を重畳できる仕様となっている。本装置で生成されるプラズマの基本特性として RF 電極の電圧、プラズマ密度、電子温度及びプラズマ電位を評価した。RF 電極の電圧は高電圧プローブを用いて測定した。プラズマ密度、電子温度及びプラズマ電位はラングミュアプローブ法で評価した。また表面波プローブを用いて、パルスプラズマにおけるプラズマ密度の減衰特性を評価した。本装置において Ar ガスを用いて生成したプラズマでは $\sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ の高密度プラズマが得られることを示した。

参考文献

- [1] 高電圧受動プローブ|テクトロニクス (最終閲覧日 2020/12/22).
<https://jp.tek.com/datasheet/passive-high-voltage-probes>
- [2] 漆谷 正義: トランジスタ技術 SPECIAL No.99 デジタルオシロスコープ活用ノート(CQ 出版, 2016).
- [3] I. D. Sudit and F. F. Chen: *Plasma Sources Sci. Technol.* **3** (1994) 162.
- [4] E. A. Fattah and H. Sugai: *Jpn. J. Appl. Phys.* **42**, (2003) 6569.
- [5] E. A. Fattah and H. Sugai: *Phys. Plasmas* **19**, (2012) 113503.
- [6] M. A. Lieberman, A. J. Lieberman: Principles of Plasma Discharge and Materials Processing (WILEY, 2005) p.334.
- [7] H. Kokura, K. Nakamura, I. P. Ghanashev and H. Sugai: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 5262.
- [8] M. A. Lieberman, A. J. Lieberman: Principles of Plasma Discharge and Materials Processing (WILEY, 2005) pp.133-139.
- [9] L. G. Christophorou and J. K. Olthoff: *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **30** (2) (2001) 449.
- [10] 犬石 嘉雄, 中島 達二, 川辺 和夫, 家田 正之: 電気学会大学講座 誘電体現象論 (電気学会, 2007)
- [11] 大木 義路: 電気電子情報工学系テキストシリーズ 11 誘電体物性 (培風館, 2009)

第3章 キャピラリープレート近傍の電荷密度 評価法の確立

3.1 はじめに

これまで高アスペクト比ホール底部の電荷蓄積の調査を目的とし先行研究の多くは、ホールの模擬としてキャピラリープレート(CP)を用い、CP 底部の測定電圧をチャージアップの指標としてきた。だが、CP 底部の電圧は CP 底部に蓄積された電荷だけでなく、CP 上部やバイアスステージ(RF 電極)の電圧にも依存し、必ずしも CP 底部の面電荷密度を表すこととならない[1][2]。第3章では本論文で最も重要となる CP 底部の面電荷密度の絶対値評価法について述べる。まず、CP 上部および底部の高周波電圧振幅の測定について述べ、CP 近傍高周波電位の分布を等価回路モデルを用いて表すことを試みる。そして、等価回路モデルをもとに CP 上部、底部および RF 電極表面に形成する面電荷密度の絶対評価法について述べる。なお、本章で使用する CP は代表的に $AR = 50$ のものを使用した。

3.2 高電圧プローブによる電圧波形測定

本研究では等価回路モデルをもとにした CP 底部の面電荷密度絶対評価を行うが、そのためには等価回路の各素子のパラメータ評価が必要となる。そこでまず、高電圧プローブ(P6105: テクトロニクス)を用いて CP 上部および CP 底部の電圧測定をおこなった。測定系は第2章の図 2-3 及び図 2-5 の通りである。図 3-1 は、VHF パルス放電時において測定した電圧波形例であり、図 3-1 (a)と(b)はそれぞれ第2章図

2-5 で示した Type-1 と Type-2 の CP セットアップにて測定した CP の上部および下部の電圧波形である。なお、CP のホール径および厚さはそれぞれ 0.3mm, 6 μ m, アスペクト比は 50 であり, VHF 電力, Ar 圧力, パルス変調周波数, デューティ比はそれぞれ 400 W, 2 Pa, 1 kHz, 50% である。本章でこの後に述べる等価回路モデルの構築および面電荷密度評価においては, 図 3-1 に例示した電圧波形をもとに RF peak-to-peak 電圧 (V_{PP}) および RF 振動成分を除いた平均電圧 (V_{AVE}) が必要となる。本研究においては, これらの電圧測定はオシロスコープのピーク検出機能[3]を用いており, V_{PP} はサンプリング周波数 500 MHz で測定した電圧波形の最大および最小ピーク電圧差より, V_{AVE} は同じくピーク検出機能を用いて得られた最大および最小電圧の連続する 4 点のデータの平均値から求めた。例えば, CP 上部電極電圧波形図 3-1 (a)に着目すると, 上記手法をもとに得られたプラズマオン時 ($t=0\sim 0.5$ ms) の CP 上部電極 V_{PP} は 420 V, V_{AVE} は ~ 190 V となる。一方, プラズマオフ時 ($t=0.5\sim 1.0$ ms) においては, V_{PP} , V_{AVE} ともに 0 V となる。これに対し, CP 下部電極図 3-1 (b)のプラズマオン時の V_{PP} は ~ 450 V であり, 上部電極よりもわずかに高い値である。また, プラズマオン時の CP 下部電極 V_{AVE} は ~ 30 V であり, 上部電極の V_{AVE} に対して正の電位差を持つ。さらに, プラズマオフ時において CP 下部電極 V_{AVE} は ~ 150 V であり, プラズマオン時と同様に上部 CP 電極の V_{AVE} に対してやはり高い正電位差を持つことがわかる。このように下部電極は, プラズマオン及びプラズマオフ時を通し, 常に CP 上部電極に対して正の電位差を保持しており, このことは Ar イオンの入射により CP の底部が正に帯電していることを示唆している。

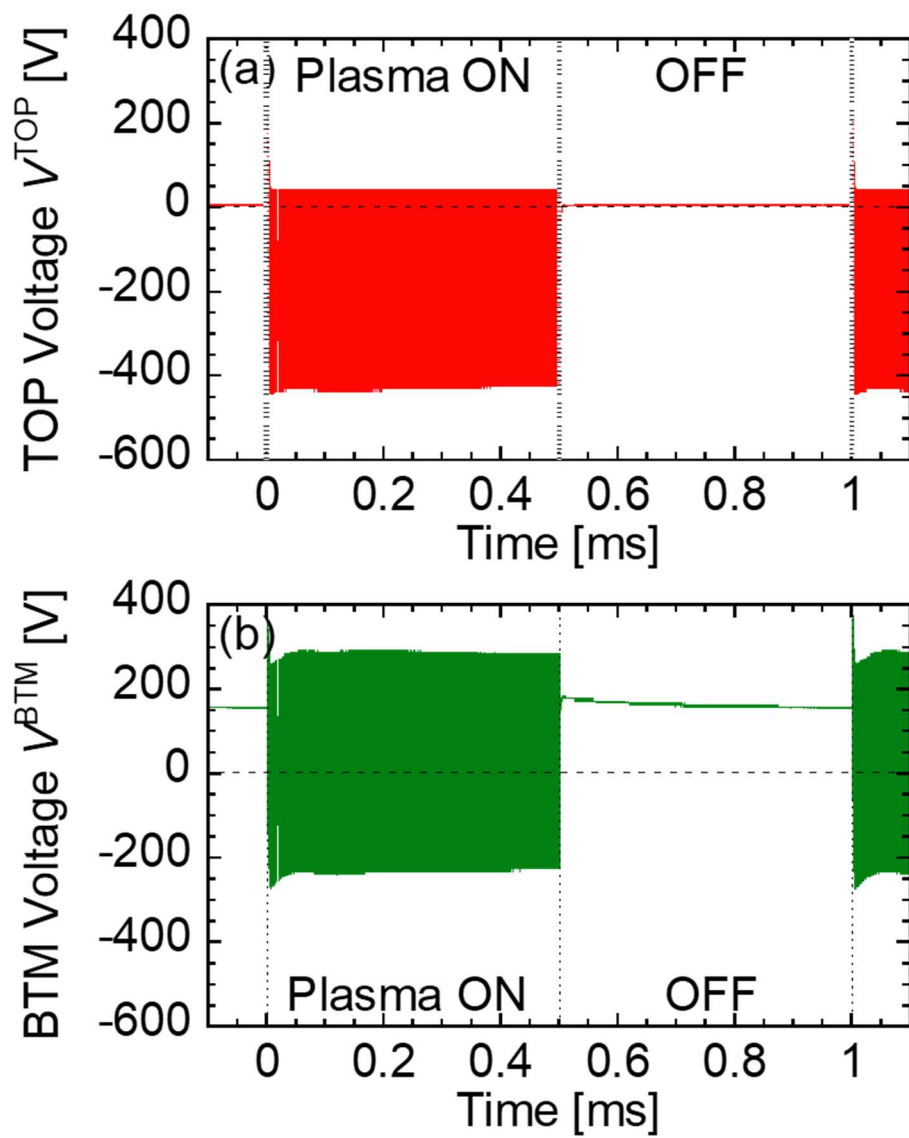


図 3-1 VHF 電力 400 W における(a)Type-1 セットアップの CP 上部電極の電圧波形
及び(b)Type-2 セットアップの CP 下部電極の測定電圧波形

また、プラズマオフ時における CP 下部平均電圧(V_{AVE}^{BTM})の時間変化に着目すると、CP 下部 V_{AVE}^{BTM} は時間とともにわずかに減衰する傾向がみられる。第 2 章で述べたように、表面波プローブを用いた電子密度の時間分解測定から、Ar 放電における VHF 電源オフ後の電子密度の減衰定数は約 $150 \mu\text{s}$ であり、CP 底部 V_{AVE} の緩やかな減少の時定数よりも短い。このことから、プラズマオフ期間中の CP 底部 V_{AVE} のゆるやかな減衰は、アフターグロープラズマからの電子の寄与のみでは説明できないことが示唆される。一方、プラズマをオンにした直後の CP 底部 V_{AVE} の時間変化に着目すると、プラズマオン後に CP 底部 V_{AVE} は $50 \mu\text{s}$ 程度で増加した後に飽和している。このわずかな電圧増加は、プラズマオフ期間中に緩和された電荷を補うために下部電極を再充電することによって引き起こされたものと推察される。

次に、CP 上部および下部電極の V_{PP} および V_{AVE} をプラズマオン時およびオフ時のそれぞれにおいて VHF 電力依存性として測定した。ここで CP 上部と底部の電圧は、それぞれ Type-1 と Type-2 のセットアップを用いて測定し、放電ガスは Ar、圧力は 2 Pa、デューティ比は 50% である。また、CP 上部電極及び下部電極の V_{PP} をそれぞれ V_{PP}^{TOP} 及び V_{PP}^{BTM} 、CP 上部電極及び下部電極の V_{AVE} をそれぞれ V_{AVE}^{TOP} 及び V_{AVE}^{BTM} と表記する。プラズマオン時およびオフ時における全ての電圧は、それぞれ VHF パルスのオンおよびオフ時の最後の $1 \mu\text{s}$ の平均値より求める。図 3-2 (a)及び(b)に V_{PP} およびの V_{AVE} の VHF 電力依存性の測定結果を示す。 V_{PP}^{TOP} と V_{PP}^{BTM} は電力の増加とともに単調に増加する。 V_{AVE}^{TOP} は、プラズマがオンの時には VHF 電力の増加に伴って単調に減少し(自己バイアス電圧の発生)、プラズマオフの時にはほぼ 0 V となる。これに対し、 V_{AVE}^{BTM} はプラズマオン時には 0~30 V で大きく変化しない一方で、プラズマオフ時は VHF 電力とともに増加し、VHF 電力 400 W において~160 V まで上昇している。

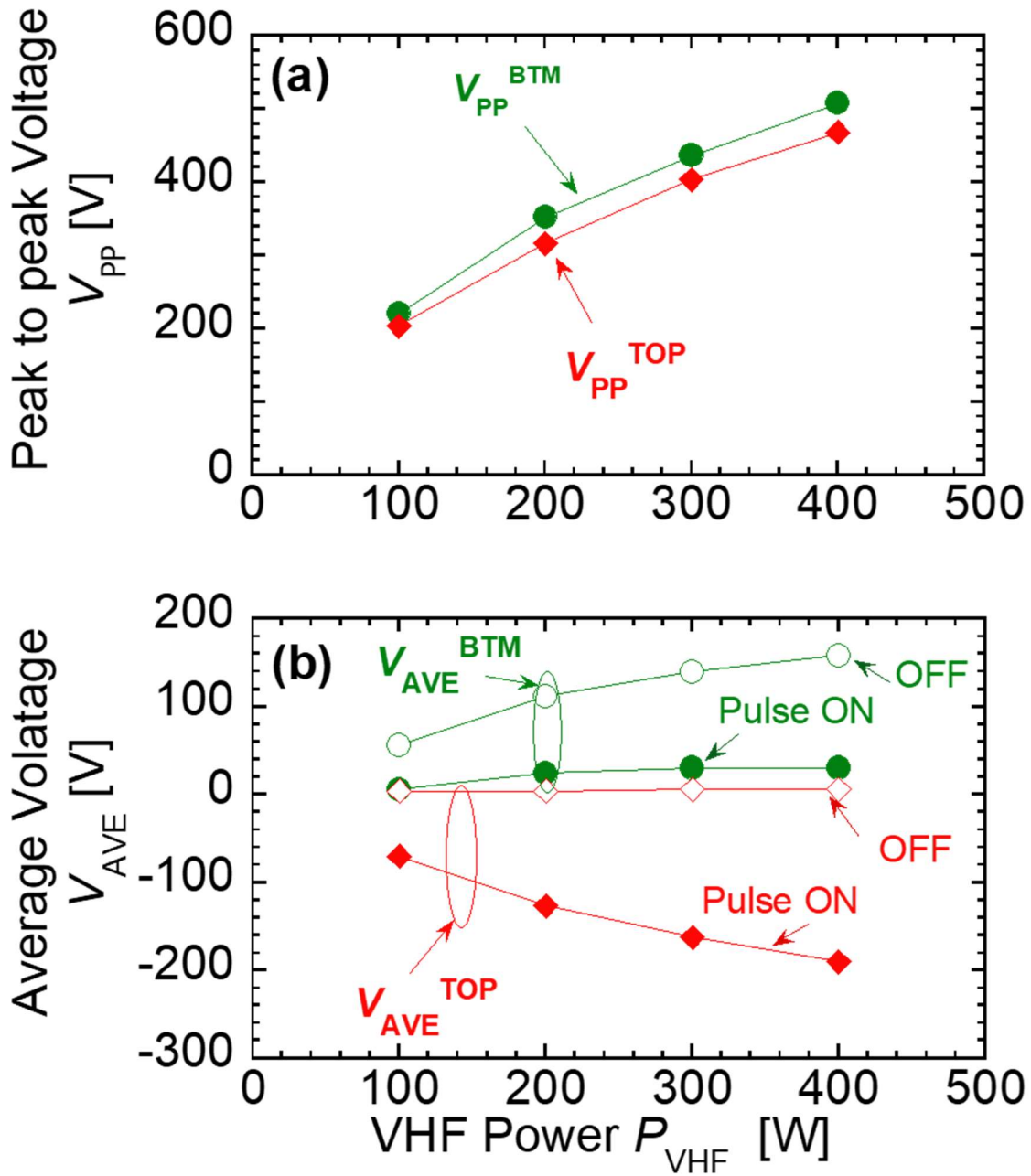


図 3-2 (a) Type-1 セットアップの上部電極(V_{PP}^{TOP})と Type-2 セットアップの下部電極(V_{PP}^{BTM})の peak-to-peak 電圧の VHF 電力依存性及び (b) Type-1 セットアップの上部電極(V_{AVE}^{TOP})と Type-2 セットアップの下部電極(V_{AVE}^{BTM})の平均電圧の VHF 電力依存性。塗りつぶしプロットと白抜きプロットは、それぞれプラズマのオン状態とオフ状態を示している。

図 3-2 からも示されている通り、CP 底部は CP 上部に対して常に正電位となっており CP 底部は正に帯電する傾向があることが示唆される。これは CP 底部に到達するイオンと電子のフラックスの違いにより説明できる。プラズマオン時において、正イオンはシースによって加速され CP ホールを通過して下部電極に注入される。また、CP 上部および下部ともに VHF 電圧によって振動しており、質量の軽い電子はこの電圧振動に追随し、CP 上部電圧が瞬時最大になる際に電子はホール内から CP 底部に入射する。しかし、電子は熱運動による数 eV の等方的なエネルギー分布を持つため、入射した電子は広い角度分布を持ち、CP 底部に到達する電子は少なくなり、CP 底部に到達する正負の荷電粒子フラックスの差が生じる。したがって、プラズマオン時において、CP 底部に流れる正味電流は正電流となり CP 底部に正電荷蓄積が起こることで CP 底部電圧が上昇する。しかし、CP 底部電圧がプラズマ電位に近づくと、イオンは CP 上部と底部の電圧差によって減速され CP 底部へのイオン電流が抑制される一方、VHF 瞬時最大電圧時に CP 底部に流れ込む電子電流は増加し、正味の正電流は減少し 0 に近づいていく。以上のように、プラズマオン状態で V_{AVE}^{BTM} がプラズマ電位に近くなるという結果は、イオンの運動エネルギーがホール内の正負電流のバランスをとる上で重要な役割を果たしていることを示している。

これらの議論より、CP 底部 V_{AVE} 電圧は CP 底部への正電荷蓄積を示す重要な指標であることはわかる。しかしながら、CP 底部 V_{AVE} は蓄積電荷だけでなく、CP 上部および RF 電極の V_{AVE} の影響も受けることから、CP 底部 V_{AVE} 電圧測定は必ずしも蓄積電荷量に対応するわけではない。本研究では CP 上部と底部の絶対面電荷密度評価のために等価回路モデルを採用する。次節ではこのモデルと等価回路に用いる回路素子パラメータの評価法について述べる

3.3 等価回路モデル構築及び回路パラメータ評価

本節では等価回路モデルをもとにした CP 面電荷密度評価を述べる。モデルの構築にあたっては、CP やアルミナ板のもつ静電容量、シース静電容量などが重要となる。しかし、その他にも 3.2 節で示した真空フィードスルーを介して接続した高電圧プローブ (HVP) による電圧測定結果においては、VHF 周波数帯でのわずかな浮遊容量が測定値に影響を与える可能性があるため、データの解析にはフィードスルーや HVP が持つインピーダンスに対する注意が必要となる。例えば、Type-1 セットアップと Type-2 セットアップでの CP 上部 peak-to-peak 電圧 V_{pp}^{TOP} を考えると、Type-2 セットアップにおいて CP 上部に電極と HVP がいないため、Type-1 セットアップによる電圧測定結果は、必ずしも Type-2 セットアップの CP 上部電圧を示しているとはいえない。また、 V_{AVE} 測定においても、CP の上部に発生する V_{pp} によって CP 上部の V_{AVE} が決定されるため、同様の問題が発生する。

この問題を解決し HVP と電極が接続されていない場合の CP 上部電圧 V_{pp} 、 V_{AVE} を求めるために、本研究では等価回路モデルを適用し、CP 上部電圧の推定をおこなった。図 3-3 に、本研究において検討した等価回路モデルを示す。ここで、 C_{ALM} は RF 電極と CP 下部電極間のアルミナ板の静電容量、 C_{CP} は CP の上部電極と下部電極間のホール空間を考慮した CP の実効静電容量、 C_{FT} は CP の上部電極と下部電極に接続され大気側に引き出された 2 本のワイヤの真空フィードする部における浮遊容量、 C_S はプラズマと上部電極間の実効シース静電容量であり、シース厚さはプラズマ密度、印加電圧などにより決定されるため、 C_S は VHF 電力の関数となる。さらに、 C_A 、 C_B 及び R_A 、 R_B は、CP 上部および下部電極電圧測定に使用した 2 つの同一モデルの HVP の入力静電容量(3 pF)及び入力抵抗(100 M Ω)である。本研究では、40 MHz およ

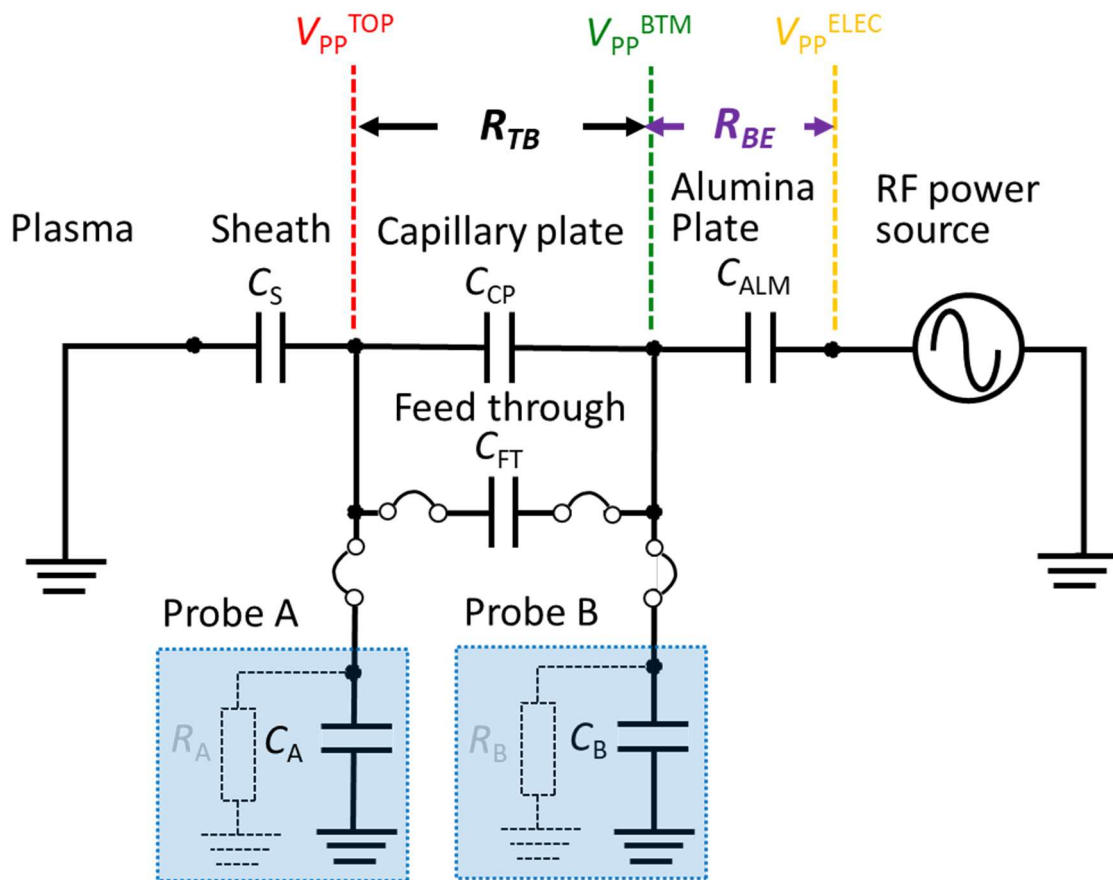


図 3-3 高電圧プローブや真空フィードスルーを含むプラズマ、CP、電源電極の等価回路モデル

び 2 MHz の周波数に対して C_A と C_B のインピーダンスは R_A と R_B のインピーダンスよりもかなり小さく、モデルにおいて入力抵抗は無視できると考えられる。なお、図 3-3 に示す等価回路は Type-3 セットアップにおける等価回路を示しており、回路図中のジャンパー線の有無により、Probe B を開放することにより Type-1 セットアップを、Probe A を開放することにより Type-2 セットアップを表す。また CP 上下部間の抵抗は 40 MHz 高周波振動に対しては CP 上下間容量性リアクタンスよりもはるかに大きいため、本章のモデルでは無視している。ただし、実際の CP には 2.4.4 で述べた通り、50°C 程度の CP 温度で 1000 M Ω 程度の抵抗となるため、kHz 領域の低周波

数において無視できないリーク電流が生じることが考えられる。さらにはフルオロカーボンプラズマでは、ホール側壁にフルオロカーボン膜が堆積してリーク電流経路として作用する。これらのことから厳密には CP 上下間のリーク抵抗を考慮する必要があるが、これについては第 5 章で議論する。

本等価回路モデルにおいては、静電容量 C_{FT} および C_{ALM} を LCR メータ(LCR40m : Peak Electronics Design)により測定しており、これらの値はそれぞれ 5.8 pF および 22 pF であった。次に、等価回路モデルに基づき、VHF 放電中の V_{PP} 測定から容量 C_{CP} と C_S を評価した。図 3-4(a)は厚さ 0.3 mm, ホール径 6 μm , アスペクト比 50 の CP を用い Type-3 セットアップにて CP 上部, CP 下部および RF 電極の V_{PP} を測定した際の VHF 電力依存性の結果である。すべての位置において V_{PP} は VHF 電力の増加に伴って単調に増加しており, V_{PP}^{ELEC} は V_{PP}^{BTM} や V_{PP}^{TOP} のほぼ 2 倍の値である。また, V_{PP}^{TOP} は V_{PP}^{BTM} よりもわずかに小さい値を示している (c.f.図 3-2)。これは、等価回路モデルで示す C_{FT} の浮遊容量の影響もあるものの、CP 静電容量(C_{CP})のインピーダンスがアルミナ板静電容量(C_{ALM})やシース静電容量(C_S)によるインピーダンスよりも小さかったことを示唆している。次にこれらの測定結果から RF 電極に対する CP 底部の V_{PP} 電圧比 ($R_{BE} = V_{PP}^{BTM} / V_{PP}^{ELEC}$), および CP 底部に対する CP 上部の V_{PP} 電圧比 ($R_{TB} = V_{PP}^{TOP} / V_{PP}^{BTM}$) を図 3-4(b)に示す。 R_{BE} および R_{TB} はそれぞれ ~ 0.58 , ~ 0.87 であり VHF 電力に対する依存性が弱いことから、等価回路モデルにおける実効シース容量 C_S および CP 静電容量 C_{CP} の変化は小さいと考えられる。次に図 3-4(b)の結果から、 C_{CP} と C_S を推定した結果を図 3-4(c)に示す。 C_{CP} は 48 pF でほぼ一定であったが、 C_S は VHF の電力に応じて 2 pF 程度までわずかに増加する。 C_S の増加は、VHF 電力の増加に伴いシース厚が減少したことで説明できる。シース電圧が電子温度より非常に大きい場合 Child-Langmuir モデルを適用することができ、その際にはシース厚はイオンフラックスとシース電圧から近似的に求められる。測定し

た電圧とプラズマ密度から評価したイオンフラックスをもとに、 V_{PP}^{TOP} が 900 V でのシース厚さを求めると 1.4 mm となり、これから求めた実効シース容量は ~ 2 pF であり、等価回路モデルで得られた結果とおよそ一致した。

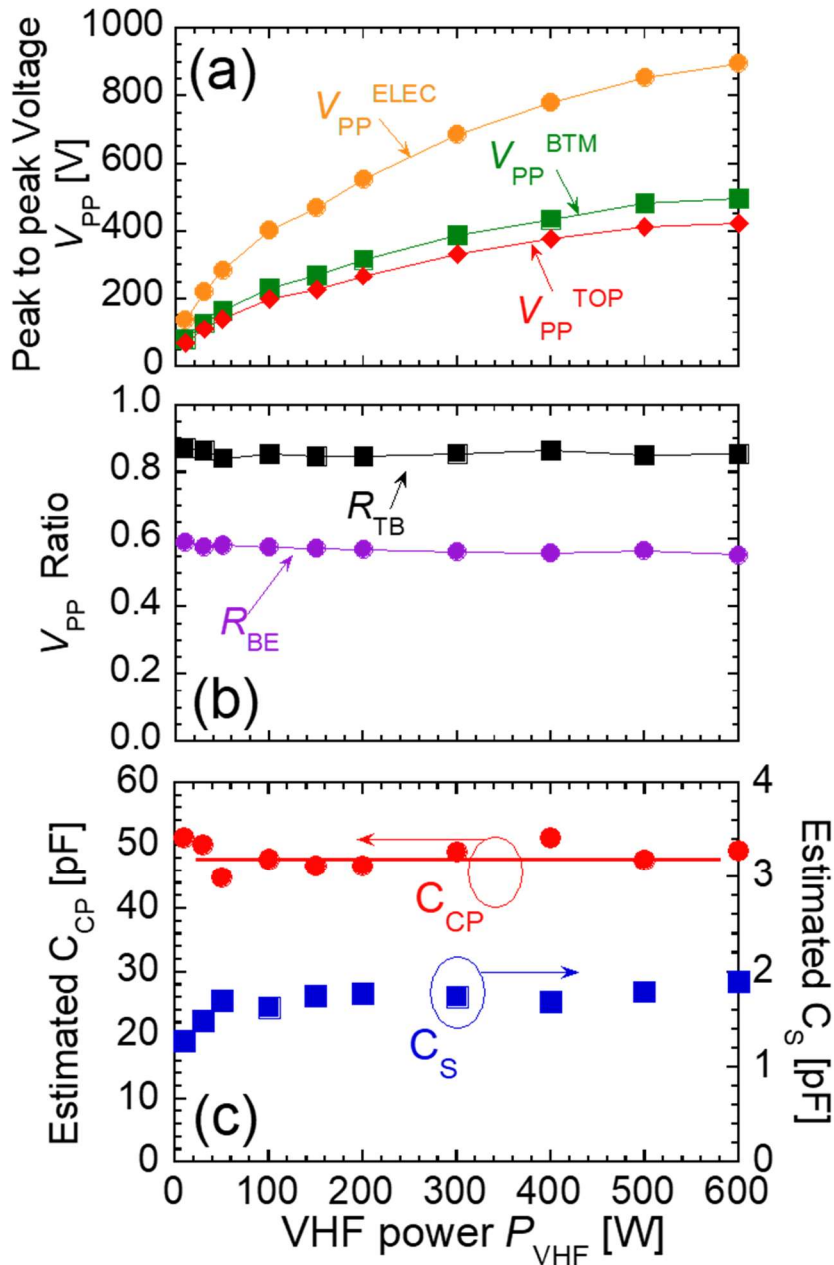


図 3-4 (a) Type-3 セットアップを使用した上部電極(V_{PP}^{TOP}), 下部電極(V_{PP}^{BTM}), および電源電極(V_{PP}^{ELEC})の peak-to-peak 電圧の VHF 電力依存性。(b) V_{PP} 比 $R_{BE}(=V_{PP}^{BTM}/V_{PP}^{ELEC})$ と $R_{TB}(=V_{PP}^{TOP}/V_{PP}^{BTM})$ の VHF 電力依存性。(c)等価回路モデルを用いて電圧比 R_{BE} と R_{TB} から評価したシース容量と CP 容量

3.4 キャピラリープレート上部の平均電圧推定

ホール底部の蓄積電荷を測定する際には CP 上部に電極を配置するとホール内にイオンを入れることができない。したがって Type-2 セットアップを用いることになるが、HVP は当然 CP 上部に接続されていないため CP 上部電圧を直接測定することができない。そこで等価回路モデルを用い、 C_A と C_{FT} を除去した後の等価回路パラメータから V_{PP}^{TOP} を推定する以外に方法はない。ここで、等価回路モデルから推定される V_{PP}^{TOP} を $V_{PP}^{TOP_EST}$ と表記する。この $V_{PP}^{TOP_EST}$ と V_{PP}^{BTM} の比を R_{TB}^{EST} とすると、 R_{TB}^{EST} は C_{CP} および C_S を用いて次の式で表すことができる。

$$R_{TB}^{EST} = \frac{V_{PP}^{TOP_EST}}{V_{PP}^{BTM}} = \frac{C_{CP}}{C_{CP} + C_S} \quad (3.1)$$

と表すことができ、これより測定された V_{PP}^{BTM} から $V_{PP}^{TOP_EST}$ を求めることができる [1][2]。RF 電極 peak-to-peak 電圧に対して R_{TB}^{EST} を求めた結果を図 3-5 に示す。比較

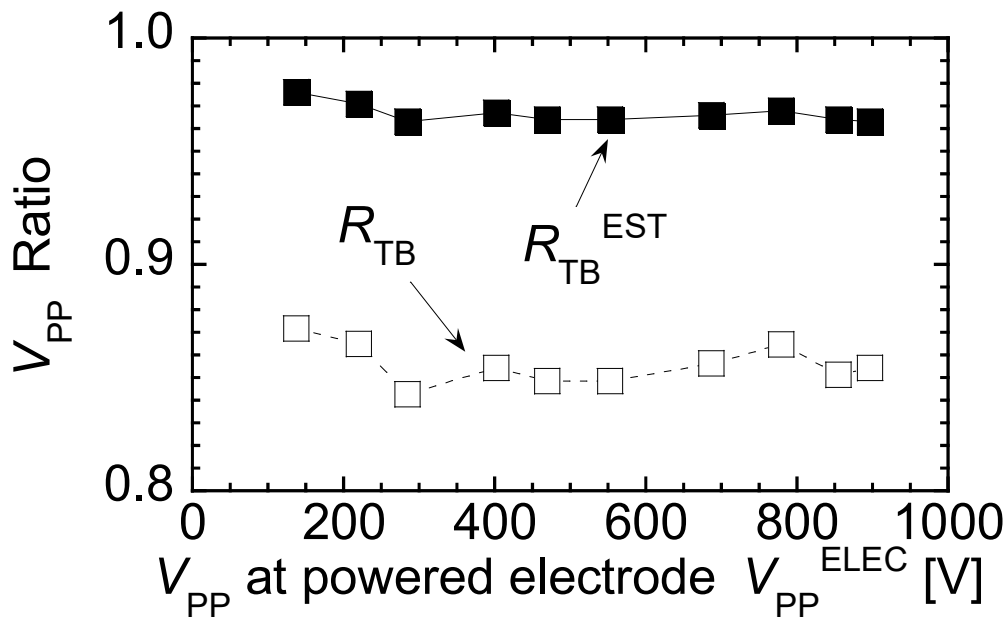


図 3-5 Type-3 における CP 上部-下部間の V_{PP} 比(R_{TB})(再掲)及び等価回路から推定した Type-2 における CP 上部-下部間の V_{PP} 比(R_{TB}^{EST})

のために図 3-4 (b)で示した R_{TB} も V_{PP}^{ELEC} に対して示した。この図より R_{TB}^{EST} は R_{TB} よりも大きく、VHF の peak-to-peak 電圧測定においては接続する HVP 等の測定結果に与える影響が大きく、 V_{PP}^{TOP} 測定において浮遊容量を正しく評価することの重要性を示している。測定した V_{PP}^{BTM} と R_{TB}^{EST} から、Type-2 セットアップの $V_{PP}^{TOP_EST}$ を評価した結果を図 3-6 に示す。これより評価した Type-2 セットアップにおける $V_{PP}^{TOP_EST}$ は Type-1 セットアップで測定した V_{PP}^{TOP} よりもわずかに高い値となることがわかった。

次に、CP 上部に HVP を接続していない Type-2 セットアップにおける CP 上部平均電圧 ($V_{AVE}^{TOP_EST}$) を $V_{PP}^{TOP_EST}$ から推定する。この推定にあたってはあらかじめ Type-1 セットアップにて CP 上部の V_{PP} に対する V_{AVE} の関係を実験的に求め、これをもと

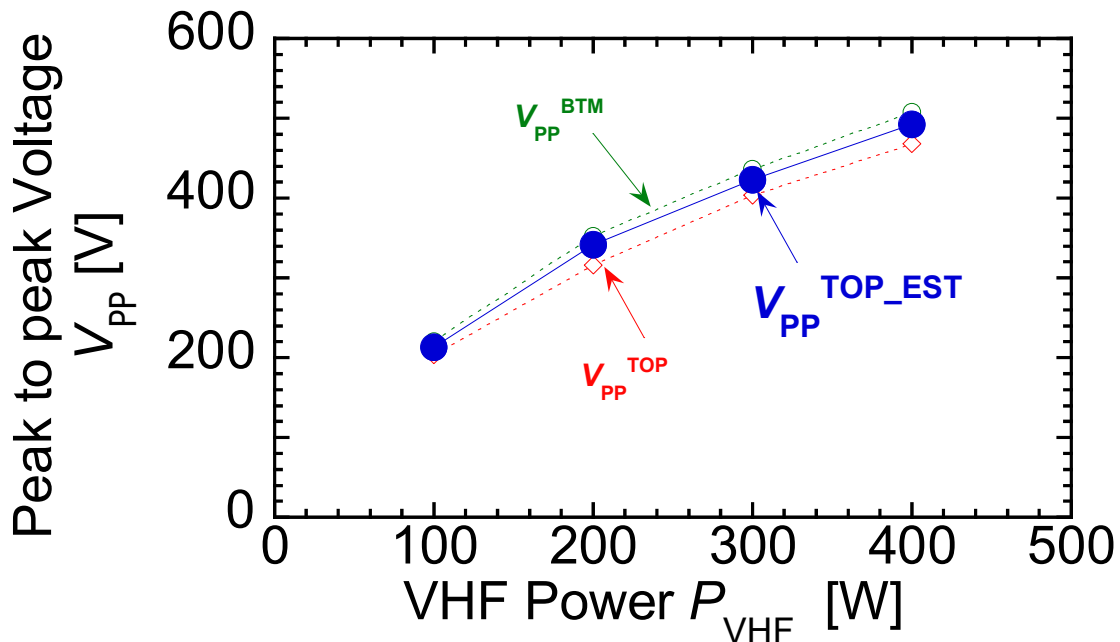


図 3-6 Type-1 セットアップにおける上部電極の peak-to-peak 電圧 V_{PP}^{TOP} (再掲), Type-2 セットアップにおける下部電極の peak-to-peak 電圧 (V_{PP}^{BTM}) (再掲) 及び上部の推定の peak-to-peak 電圧 ($V_{PP}^{TOP_EST}$) の VHF 電力依存性

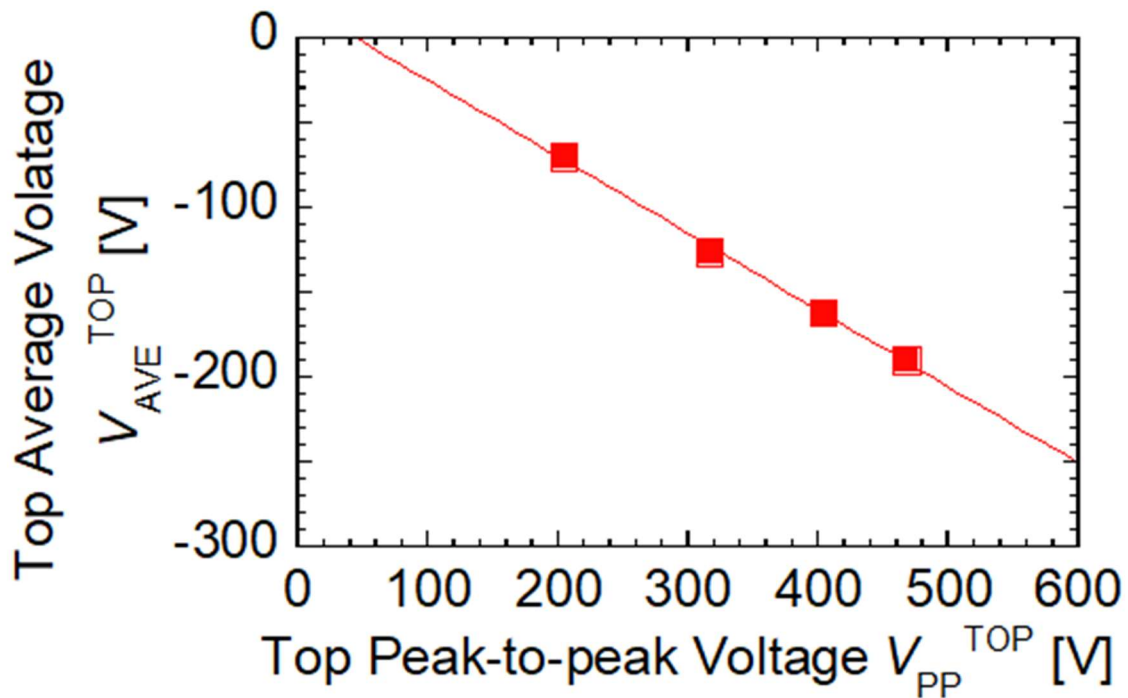


図 3-7 Type-1 セットアップにおける peak-to-peak 電圧 V_{PP}^{TOP} と平均電圧 V_{AVE}^{TOP} の相関

に $V_{PP}^{TOP_EST}$ から $V_{AVE}^{TOP_EST}$ を求める。図 3-7 に Type-1 セットアップで測定した V_{PP}^{TOP} に対する V_{AVE}^{TOP} の関係を示す。RF 自己バイアス電圧の発生により、 V_{AVE}^{TOP} は V_{PP}^{TOP} に対してほぼ線形的に減少している[4][5]。Type-2 セットアップの $V_{AVE}^{TOP_EST}$ もこの関係に従うことから、 $V_{PP}^{TOP_EST}$ から推定した $V_{AVE}^{TOP_EST}$ の VHF 電力依存性を図 3-9 に青プロットで示す。なお図中の他の結果は図 3-2 と同じものである。結果として今回の評価によって得られた $V_{AVE}^{TOP_EST}$ は Type-1 の V_{AVE}^{TOP} と大きな違いは見られなかったが、一般的な測定系においては必ずしも $V_{AVE}^{TOP_EST}$ と V_{AVE}^{TOP} の差が小さいとは限らないため、本手法で正確な値を得ることは重要であると考えられる。

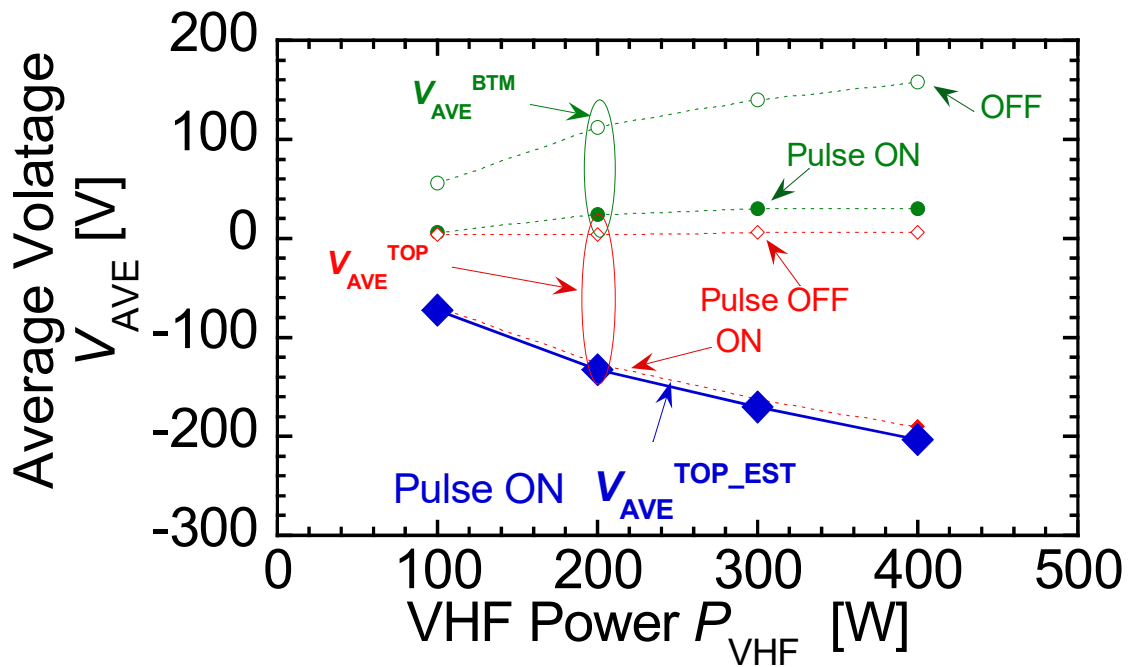


図 3-8 Type-1 セットアップの上部電極の平均電圧 V_{AVE}^{TOP} (赤プロット:再掲), Type-2 セットアップの下部電極の平均電圧 V_{AVE}^{BTM} (緑プロット:再掲), およびプラズマ ON 時の推定上部平均電圧 $V_{AVE}^{TOP_EST}$ (青プロット), の VHF 電力依存性。塗りつぶしプロットと白抜きプロットは, それぞれプラズマのオン状態とオフ状態を示している。

3.5 静電モデルによる電荷密度評価法の提案及び評価例

上記の等価回路モデルから導出された V_{AVE} と静電容量から、CP 各部の面電荷密度を求める。図 3-9 は面電荷密度評価において用いたモデルである。これはプラズマ-シース-CP-アルミナ板-RF 電極に至る領域において、各部の面電荷密度および電束密度、静電容量を模式的に表したものである。図 3-9 (a) に示すように、シース端、CP 上部、CP 下部および RF 電極各部の面電荷密度を σ_P , σ_T , σ_B , σ_E と定義する。なお、シース領域においては正電荷がシース空間内に広がって分布しているが、このモデルにおいては、電荷はプラズマ-シース境界に配置された面電荷密度とした。一般に面電荷 σ が存在する場合、面法線方向には電束密度 $D = \sigma/2$ が誘起される[6]-[8]。したがって、シース端、CP 上部、CP 下部および RF 電極各部の面電荷によって誘起される電束密度 D_P , D_T , D_B , D_E (図 3-9 (b)) はそれぞれ次のように表される。

$$D_P = \sigma_P/2, \quad D_T = \sigma_T/2, \quad D_B = \sigma_B/2, \quad D_E = \sigma_E/2 \quad (3.2)$$

次に、シース、CP、アルミナ板の各領域内の電束密度をそれぞれ D_S , D_{CP} , D_{ALM} (図 3-9 (c)) とすると、重ね合わせの原理からこれらの電束密度は次のように表される。

$$D_S = D_P - D_T - D_B - D_E, \quad (3.3)$$

$$D_{CP} = D_P + D_T - D_B - D_E, \quad (3.4)$$

$$D_{ALM} = D_P + D_T + D_B - D_E \quad (3.5)$$

また、RF 電極とプラズマ中の電界はほぼ 0 であることから、次の式も得られる。

$$D_P + D_T + D_B + D_E = 0 \quad (3.6)$$

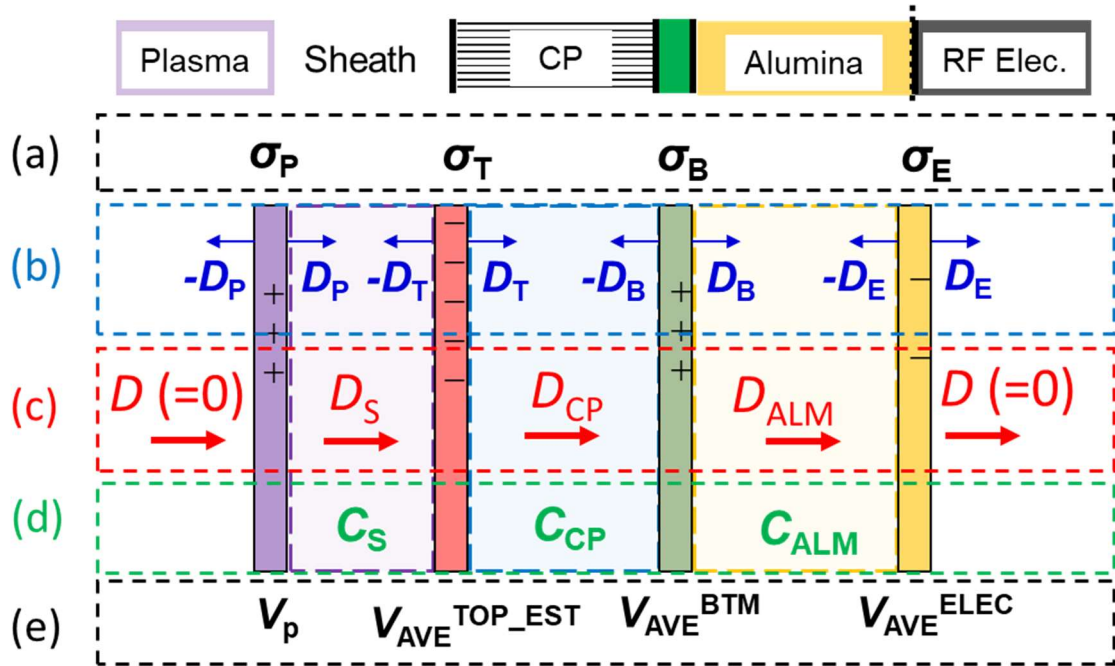


図 3-9 CP 近傍境界の(a) 面電荷密度, (b)面電荷から生じる電束密度, (c)境界間の合成電束密度, (d)境界間静電容量, および(e)境界電位を元にした静電モデル

一方, シース電位差 ($V_S = V_{AVE}^{TOP} - V_P$), キャピラリプレート両端電位差 ($V_{CP} = V_{AVE}^{BTM} - V_{AVE}^{TOP_EST}$) とアルミナ板両端電位差 ($V_{ALM} = V_{AVE}^{ELEC} - V_{AVE}^{BTM}$) の各部電位差は D_S , D_{CP} , D_{ALM} を用いて以下のようにあらわされる。

$$V_S = E_S d_S = -D_S (d_S / \epsilon_0) = -D_S / C_S, \quad (3.7)$$

$$V_{CP} = E_{CP} d_{CP} = -D_{CP} (d_{CP} / \epsilon_0 \epsilon_{CP}) = -D_{CP} / C_{CP}, \quad (3.8)$$

$$V_{ALM} = E_{ALM} d_{ALM} = -D_{ALM} (d_{ALM} / \epsilon_0 \epsilon_{ALM}) = -D_{ALM} / C_{ALM}. \quad (3.9)$$

ここで, ϵ_0 , ϵ_{CP} , ϵ_{ALM} はそれぞれ真空誘電率, CP のホール開口率を考慮した実効的 CP 誘電率およびアルミナ誘電率, d_S , d_{CP} , d_{ALM} はそれぞれシース, CP およびアルミナ板厚であり, これらはそれぞれの等価回路モデルにおける静電容量に関係づけ

られる。以上より、式(3.2)-(3-6)を用いて式(3.7)-(3.9)を解くことにより、実験から求めた各部平均電圧 V_{AVE} を用いて表面電荷密度 σ_P , σ_T , σ_B , σ_E を求めることができる。

この方法により得られた σ_P , σ_T , σ_B , σ_E の VHF 電力依存性を図 3-1 1 に示す。ここで用いた CP は前述と同じくアスペクト比 50, 厚さ 0.3 mm, ホール径 6 μm であり, Ar 圧力は 2 Pa である。プラズマオン時におけるシース面電荷密度(図 3-1 0 (a)) は, シースの等価容量が他の容量に比べて小さいため, CP 部の面電荷密度よりもかなり低い値となる。また, プラズマオフ時にシースは存在せず面電荷密度は 0 とするため, ここには記載していない。

CP 上部面電荷密度(図 3-1 0 (b)) はプラズマオン時において, CP 上部に発生する自己バイアス(V_{AVE}^{TOP})により負に帯電し, VHF 電力の増加とともに負面電荷密度が単調に増加する。特筆すべきは, プラズマオフ時においても CP 上部面電荷密度は 0 にならないことである。これは, CP 下部に蓄積された正電荷によって誘起される電界を遮蔽するため表面に負電荷が残留するためである。

CP 下部の面電荷密度(図 3-1 0 (c))はプラズマオンおよびオフに対して, その変化は小さい。このことは CP 底部に蓄積した電荷の緩和が極めて起こりにくいことを示唆している。なお, オンとオフにおける面電荷密度のわずかな違いは, パルス VHF プラズマにおけるプラズマオフ時のわずかな電荷緩和によるものと考えられる。図 3-1 (b)に示した CP 底部の電圧波形に改めて注目すると, プラズマオン直後においてわずかな電圧上昇が見られその後定常状態に達している。一方, プラズマオフ時において CP 下部電圧は緩やかな減少を示している。これらの電圧変化はプラズマオフ時に CP 下部の正電荷が流出し, プラズマオン時に蓄積することを示唆している。プラズマオン時とオフ時の特徴的な電圧挙動については第 5 章で電荷密度の変化として詳細に議論する。

RF 電極面電荷密度(図 3-1 0 (d))は CP 上部と同様, プラズマオフ時に負の表面電

荷が残留している。またプラズマオン時に注目すると電荷密度の絶対値が小さいことがわかる。これは、プラズマオン時において、RF 電極面電荷が CP 上部に蓄積した負電荷を遮蔽するように蓄積することを示唆する。

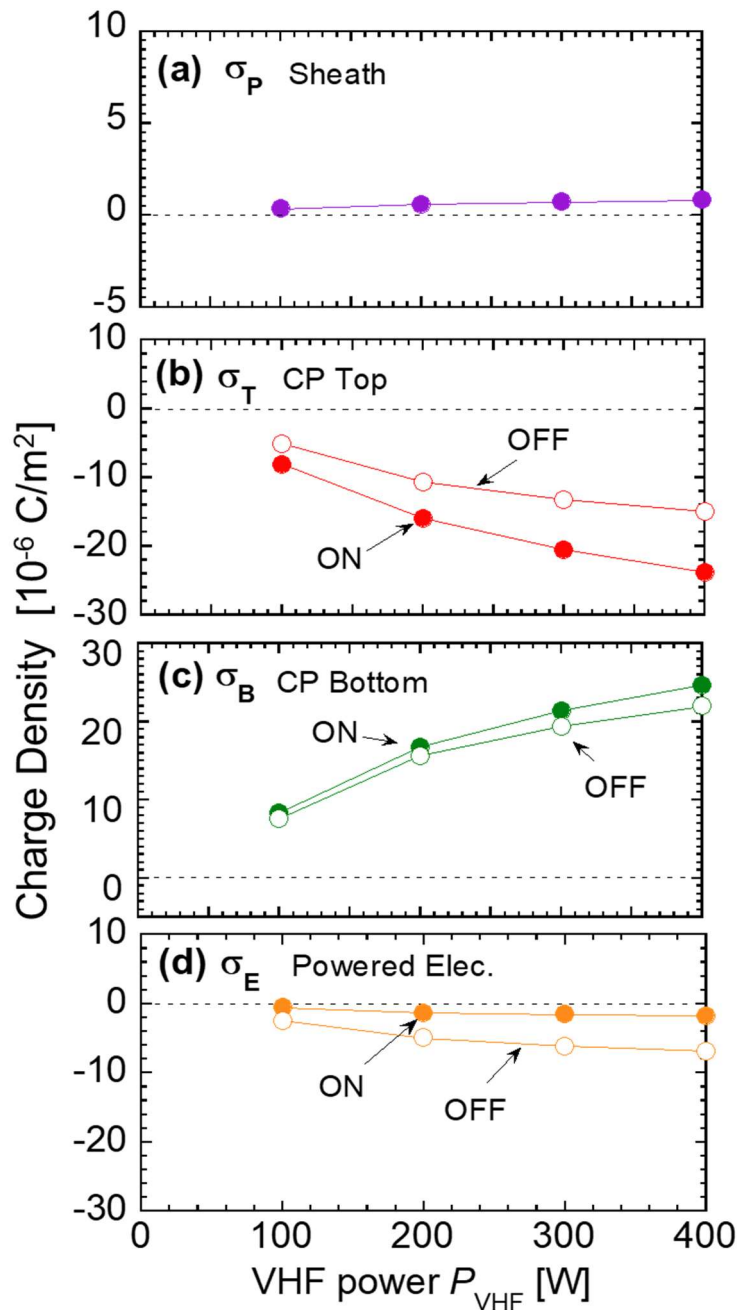


図 3-10 Type-2 セットアップにおける(a)シース, (b)CP 上部, (c)CP 底部, (d)電源電極の表面電荷密度の VHF 電力依存性。塗りつぶしたプロットと白抜きプロットは、それぞれプラズマオン時とオフ時の表面電荷を示している。

3.6 まとめ

第3章では本論文で最も重要なキャピラリープレート(CP)底部の面電荷密度絶対評価法について述べた。面電荷密度は静電気学をもとに、静電容量と電圧から求めることができる。そのため、本章ではまず CP 上下の高周波電圧振幅を高電圧プローブで測定し、CP の静電容量を評価した。次に、CP 上下部の平均電圧と CP 静電容量をもとに面電荷密度を評価したが、CP 上部に電極を設置した構造（前章において説明した Type-1 セットアップに対応）では CP 底部にイオンが流入できず、CP 底部の蓄積電荷の評価が不可能であるため、CP 上部に電極を配置していない状態での CP 上部電位を推定する必要がある。そこで本研究においては、CP 上部の平均電圧が CP 上部に発生した高周波電圧振動に起因して発生する自己バイアス電圧であることに着目し、プラズマから RF 電極までの構造をコンデンサから成る等価回路で表し、それをもとにして RF 電極高周波電圧振幅から CP 上部高周波電圧振幅を推定し、そこから CP 上部自己バイアス電圧を評価した。この方法によって得られた CP 上下部の平均電圧から静電モデルを用いて各境界における面電荷密度を求めることに成功した。

参考文献

- [1] 小郷 寛, 小亀 英己, 石亀 篤司: 基礎からの交流理論 (電気学会, 2012).
- [2] 白藤 立: 電気回路基礎 (プレアデス社, 2018).
- [3] 漆谷 正義: トランジスタ技術 SPECIAL No.99 デジタルオシロスコープ活用ノート(CQ 出版, 2016).
- [4] 菅井 秀郎: プラズマエレクトロニクス (オーム社, 2009) p.115.
- [5] Y. P. Raizer, M. N. Shneider, N. A. Yatsenko: Radio-Rrequency Capacitive Discharges (CRC Press, 2017) p.115.
- [6] 小塚 洋司: 新装版 電気磁気学 その物理像と詳論 (森北出版株式会社, 2012).
- [7] 遠藤 雅守: 電磁気学 はじめて学ぶ電磁場理論 (森北出版株式会社, 2013).
- [8] U. S. Inan, A. S. Inan, R. K. Said: Engineering Electromagnetics and Wave SECOND EDITION (REASON, 2016).

第4章 定常状態におけるキャピラリー プレート底部の電荷密度評価

4.1 はじめに

第3章でも述べた通り、従来、高アスペクト比のホール底部におけるチャージアップは電圧測定を基に議論されてきた。本研究では等価回路モデル及び静電モデルから電荷密度を求める手法を確立したため、測定した電圧からホール底部の面電荷密度を求めることができる。本章ではパルスプラズマ中におけるパルスオンとオフの切替えの直前(このタイミングをそれぞれパルスオフ定常及びパルスオン定常と定義する)に注目して面電荷密度をホールのアスペクト比や印加電力に対して評価をおこない、そこから電荷の挙動を考察する。また、電荷の挙動を考察するにあたり、シースで加速されたイオンのエネルギーが重要となる。そのため、イオンエネルギーの指標として各 VHF 電力に対応する CP 上部の平均電圧を基に検討を行った。

4.2 VHF 単周波における電荷密度評価

4.2.1 パルス放電における CP 底部電荷密度の AR 依存性

図 4-1 に VHF パルス Ar 放電において 3 種類の異なるアスペクト比((a)12, (b)50 (c)100)の CP を用いて CP 上部電圧(V_{AVE}^{TOP})および下部電圧(V_{AVE}^{BTM})を測定した際の代表的な平均電圧波形を示す。 V_{AVE}^{TOP} および V_{AVE}^{BTM} はそれぞれ Type-1 および 2 セットアップで測定した。実験条件は、Ar 圧力 2 Pa , ピーク VHF 電力 200 W , パルス周波数 1 kHz 及びデューティー比 50%である。CP 厚さ 0.3, 0.3, 1.0 mm に対応している。

また図において $t = 0$ および 0.5 ms はそれぞれパルス VHF 電力がオンおよびオフとなる時刻である。まずパルスオン時の波形に着目する。パルスオン時において、 $V_{\text{AVE}}^{\text{TOP}}$ は CP のアスペクト比によらずほぼ一定の負バイアス電圧を示す。また、パルスオン時の $V_{\text{AVE}}^{\text{BTM}}$ も $V_{\text{AVE}}^{\text{TOP}}$ と同様に、アスペクト比によらず $t = 0 \text{ ms}$ の直後において電圧減少を示す。しかしながら、 $V_{\text{AVE}}^{\text{BTM}}$ は $\text{AR} = 12$ (図 4-1 (a)) および 50 (図 4-1 (b)) では $t = 0 \sim 0.1 \text{ ms}$ の時間においてわずかな電位上昇を示すものの、 $\text{AR} = 100$ (図 4-1 (c)) ではそれがほとんどみられない。これは、 12 及び 50 のような AR においては CP 底部に正イオンによるチャージアップが生じているため、 $\text{AR} = 100$ では AR が高いがためにチャージアップが生じていないことが考えられる。

さらに $\text{AR} = 12$ ではパルスオン直後の電位上昇の後に $V_{\text{AVE}}^{\text{BTM}}$ の減衰振動がみられることがわかる。この現象は非常に興味深く、正イオンがもつ慣性によって過剰なチャージアップが生じ、蓄積した電荷を緩和するために電子の流入が生じる。このとき、電子は非常に早く応答するがイオンがそのチャージに対応できないため生じるのではないかと考える。

次にパルスオフ時の波形に着目すると、 $\text{AR} = 12$ および 50 では $V_{\text{AVE}}^{\text{BTM}}$ は $\sim 120 \text{ V}$ まで上昇した後、パルスオフ時間中に徐々に減少していく。これは、CP 底部にアフターグロープラズマからの電子流入と CP 抵抗を介した蓄積電荷のリークによるものだと考えられる。一方 $\text{AR} = 100$ ではパルスオフ直後の電位の上昇はわずか $+20 \text{ V}$ 程度までしか上昇しない。これは CP 底部の蓄積電荷量が少ないためと考えられる。

なお、本章においてはこの後、パルスオンおよびオフ時の最後の $1 \mu\text{s}$ の電圧に着目し議論を進めるが、これをパルスオン定常およびパルスオフ定常と定義する。また本章での $V_{\text{AVE}}^{\text{TOP}}$ 、 $V_{\text{AVE}}^{\text{BTM}}$ および $V_{\text{AVE}}^{\text{TOP-EST}}$ はそれぞれ、Type-1 セットアップのパルスオン及びオフ定常時 CP 上部電圧、Type-2 セットアップのパルスオン及びオフ定常時 CP 下部電圧および等価回路モデルから推定された Type-2 セットアップのパルスオン

及びオフ定常時 CP 上部電圧を表すこととする。

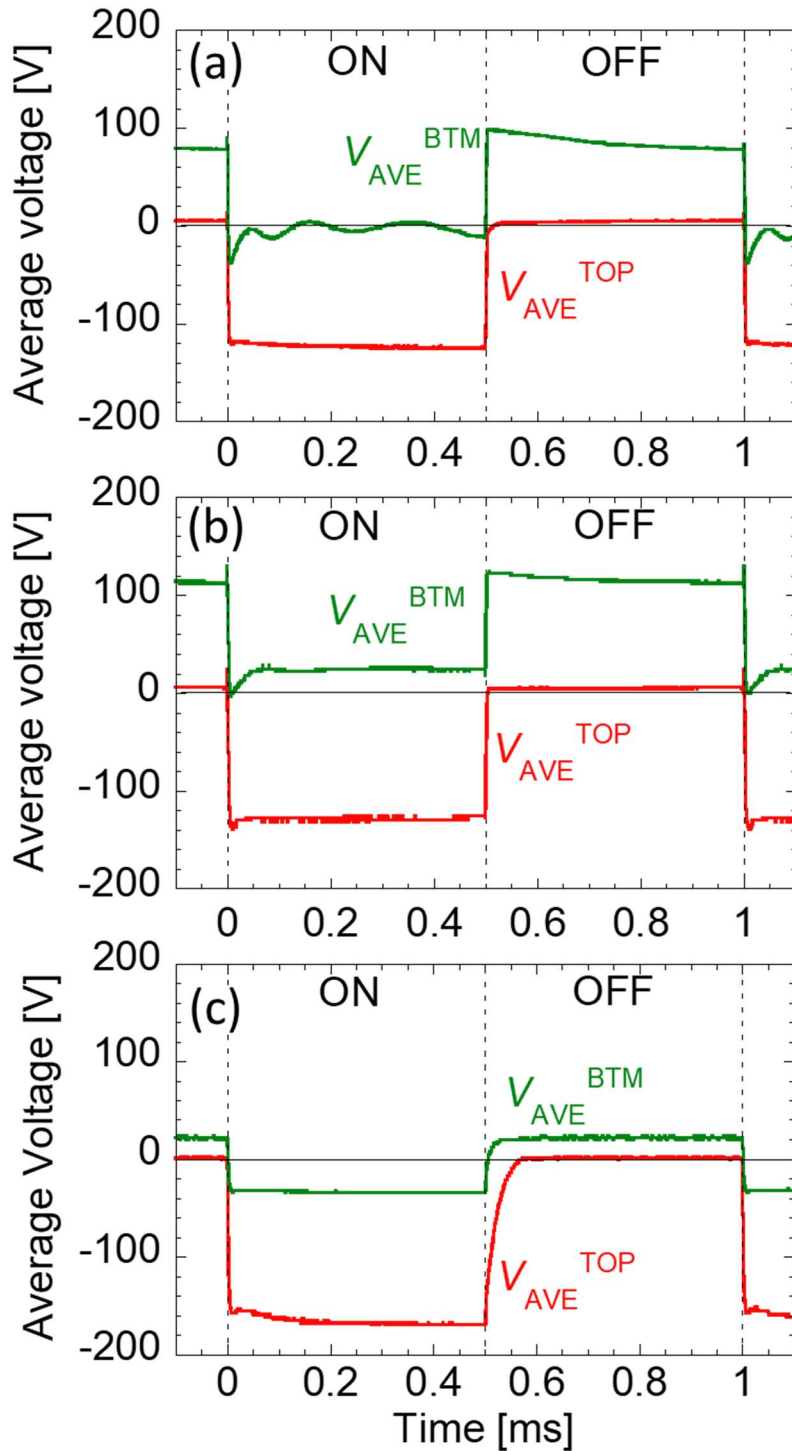


図 4 - 1 AR = 12(a), AR = 50(b), AR = 100(c)における V_{AVE}^{TOP} (Type-1)及び V_{AVE}^{BTM} (Type-2)波形例

次に 図 4-1 と同一の放電条件におけるパルスオン定常時の V_{AVE}^{BTM} に着目し、AR = 12, 30, 50, 75 および 100 のそれぞれの CP に対して VHF 電力に対する V_{AVE}^{BTM} の変化を調べた。ここで AR = 12, 30 および 50 にて CP 厚さはすべて 0.3 mm でありホール径はそれぞれ 25 μm , 10 μm および 6 μm である。AR=75 および 100 において CP 厚さは 0.75 mm および 1.0 mm であり、ホール径はともに 10 μm である。横軸を $V_{AVE}^{TOP_EST}$ として、各 CP において V_{AVE}^{BTM} の変化を見た結果を図 4-2 に示す。ここで、参考のため図中において $V_{AVE}^{TOP_EST}$ を破線にて示している。 V_{AVE}^{BTM} は実験条件によらず常に $V_{AVE}^{TOP_EST}$ よりも高い値を示しているが、 $V_{AVE}^{TOP_EST}$ に対する V_{AVE}^{BTM} 依存性は CP のアスペクト比によって大きく異なる。しかしながら、結果をよく見ると、どの AR にお

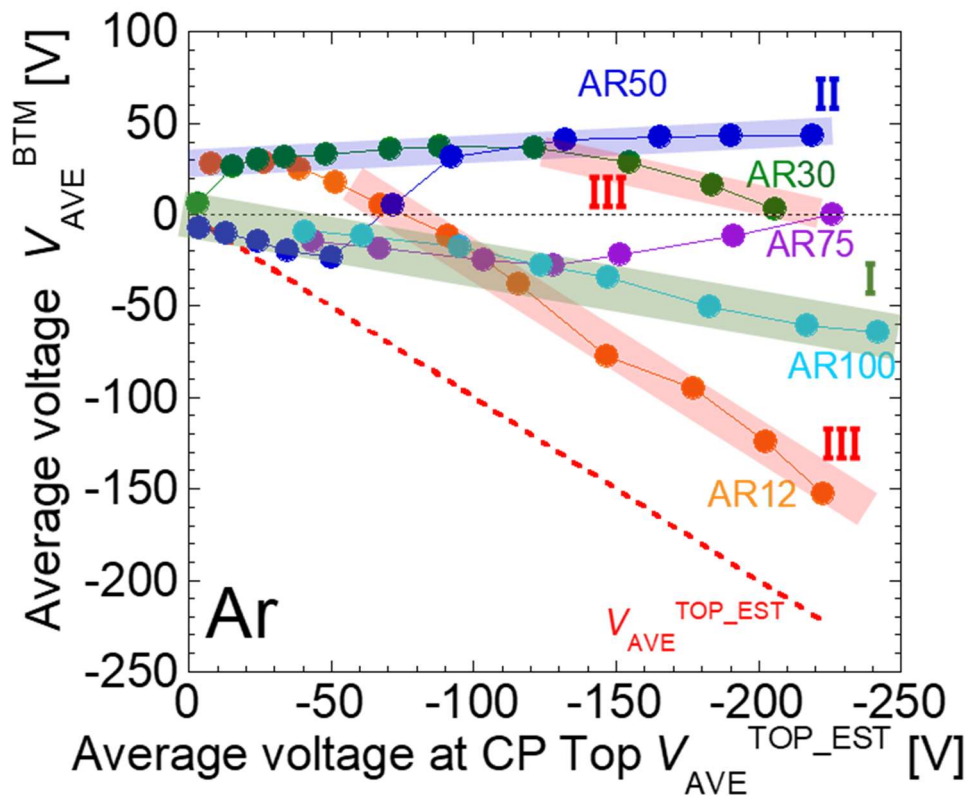


図 4-2 純 Ar プラズマにおける AR = 12 - 100 の V_{AVE}^{BTM} の CP 上部の自己バイアス ($V_{AVE}^{TOP_EST}$)依存性

いても $V_{AVE}^{TOP_EST}$ に対する V_{AVE}^{BTM} の依存性はおよそ3つの傾向に分けられることがわかる。以下、3つの傾向について順次説明を加える。図4-2に傾向Iとして示すように、AR=50, 75及び100のCPにおいては、 $V_{AVE}^{TOP_EST}$ に対して V_{AVE}^{BTM} が比例して減少する傾向の存在が確認される。この傾向におけるに $V_{AVE}^{TOP_EST}$ に対する V_{AVE}^{BTM} の一定の減少勾配は、前章で示した等価回路モデルにおけるCPおよびアルミナ板の静電容量の直列接続において、CP底部に電荷蓄積が起こらない状況を考えることで理解される[1][2]。すなわち、CP上部に発生する電位が静電容量により電圧分割され、CP底部にCP上部と比例した電圧を発生するため、傾向Iのような一定勾配の電圧変化が現れるものといえる。裏返して言えば、傾向IはCP底部への顕著な電荷蓄積が起こっていないことを示している。なお、AR=12および30においてはこのような現象はみられないが、これはアスペクト比が小さいため、低いVHF電力においても容易に正電荷蓄積が起こるためと考えられる。

次に、AR=12, 30, 50において V_{AVE}^{BTM} がプラズマ電位程度(~30V)に留まる傾向が観測され、これを傾向IIとした。これはプラズマ電位と $V_{AVE}^{TOP_EST}$ の電位差(自己バイアス電圧)で加速されたイオンがCPの上部から底部にかけての電位障壁により再び減速され、 V_{AVE}^{BTM} がプラズマ電位になるとイオンがCP底部に到達できず電流制限が生じるためと考えられる。なお、傾向IIにおいて、飽和 V_{AVE}^{BTM} が $V_{AVE}^{TOP_EST}$ に対してわずかに上昇しているが、これはCP上部 peak-to-peak 電圧の増加にともない、CPへのイオン入射エネルギー幅が広がるためと推測される。また、AR=75および100においては傾向IIが見られないが、これは高アスペクト比のためCP底部への正電荷蓄積が十分に起こらず、傾向IIまで到達できないことが原因と考えられる。

最後に、AR12, 30では、高い $V_{AVE}^{TOP_EST}$ において V_{AVE}^{BTM} の減少がみられ、傾向IIから傾向IIIに転じる。傾向Iとの大きな違いは、 $V_{AVE}^{TOP_EST}$ と一定の電位差(ΔV_{AVE})を保ちながら $V_{AVE}^{TOP_EST}$ と共に減少していく点にある。これは傾向Iの際に述べた静電

容量による電圧分割では説明できず、パルスオンおよびオフ時を通した CP 底部への電荷流入と電荷流出のバランスに起因しているものと考えられるが、詳細は後述する。

図 4-2 と同様に $V_{AVE}^{TOP_EST}$ に対する V_{AVE}^{BTM} の依存性を C_4F_8/O_2 添加 Ar プラズマにおいておこなった結果を図 4-3 に示す。実験においては AR12, 30 および 50 の CP を用い、圧力は 2 Pa, Ar, C_4F_8 , O_2 流量比は 60%, 27% 13%, パルス周波数 1 kHz, パルスデューティ比 50% である。純 Ar プラズマの結果と比較すると、添加プラズマにおいても純 Ar プラズマ(図 4-2)と同じく傾向 I-III が存在し同様の傾向を示すものの、 $V_{AVE}^{TOP_EST}$ に対する依存性がやや緩やかな点、 V_{AVE}^{BTM} がわずかに高くなる点が異なる。これはフルオロカーボンプラズマにおいてはプラズマ中に負イオンが生成されているため、相対的に電子密度が低下したことによる電子フラックス低下が起

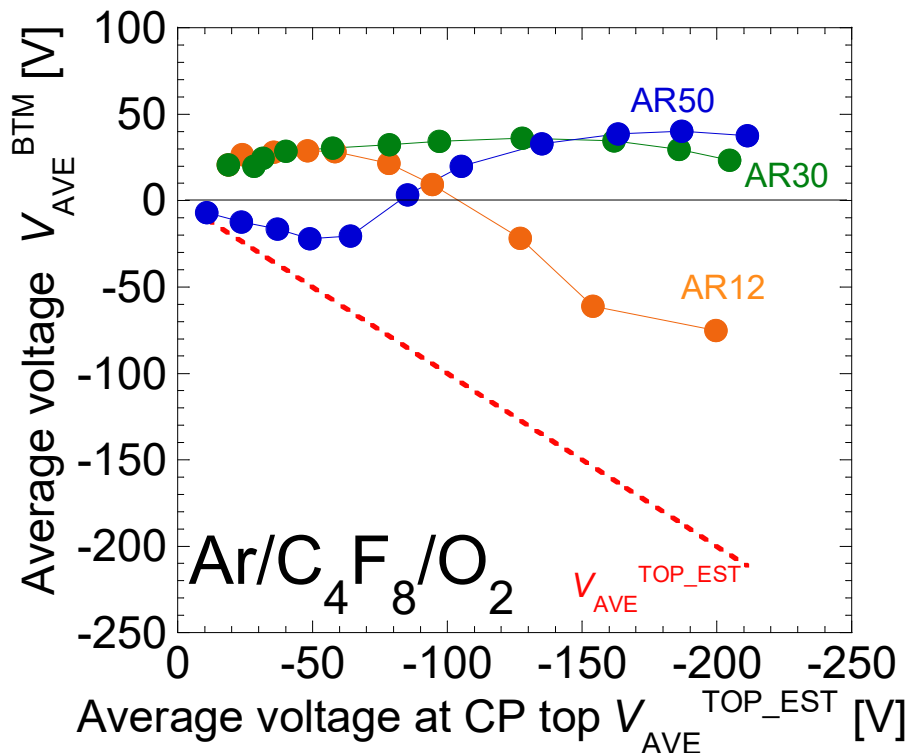


図 4-3 C_4F_8/O_2 添加 Ar プラズマにおける AR=12-50 の V_{AVE}^{BTM} の CP 上部自己バイアス($V_{AVE}^{TOP_EST}$)依存性

因している可能性が考えられる。負イオンについては4.3.2でも述べるが、直接的な流入は難しいと考える。

図 4-2 と図 4-3 に示した定常時 CP 底部平均電圧から、3.5 節で述べた手法を元に、純 Ar および C₄F₈/O₂ 添加 Ar プラズマにおいて、AR = 12, 30, 50 の CP 底部面電荷密度(σ_B)を評価した結果を図 4-4 に示す。白抜きプロットは純 Ar プラズマを、塗り潰しプロットは C₄F₈/O₂ 添加 Ar プラズマをそれぞれ表し、放電条件は図 4-2 および図 4-3 と同じである。 σ_B は AR に依存して $V_{AVE}^{TOP_EST}$ に対して特徴的な変化をする。まず、AR=30 に注目すると、 σ_B は $V_{AVE}^{TOP_EST}$ に対して単調増加し、-200 V でやや飽和傾向に変化する。次に、AR=50 においては $V_{AVE}^{TOP_EST}$ が -70V 程度までの低電圧領域において σ_B は小さく、 $V_{AVE}^{TOP_EST}$ が -70 V を超えるあたりから σ_B は急激に増加し、その後は AR=30 と同様の傾向となる。AR=30, 50 に対し、AR=12 における σ_B は -30 V 程度の低 $V_{AVE}^{TOP_EST}$ まで単調増加、その後 -100V 程度以上では飽和、さらに $V_{AVE}^{TOP_EST}$ を増加すると σ_B の減少が生じる。この σ_B 減少の原因としては、パルスプラズマにおける VHF 電力オフ時による電荷緩和と VHF 電力オン時における電子流入が考えられる。

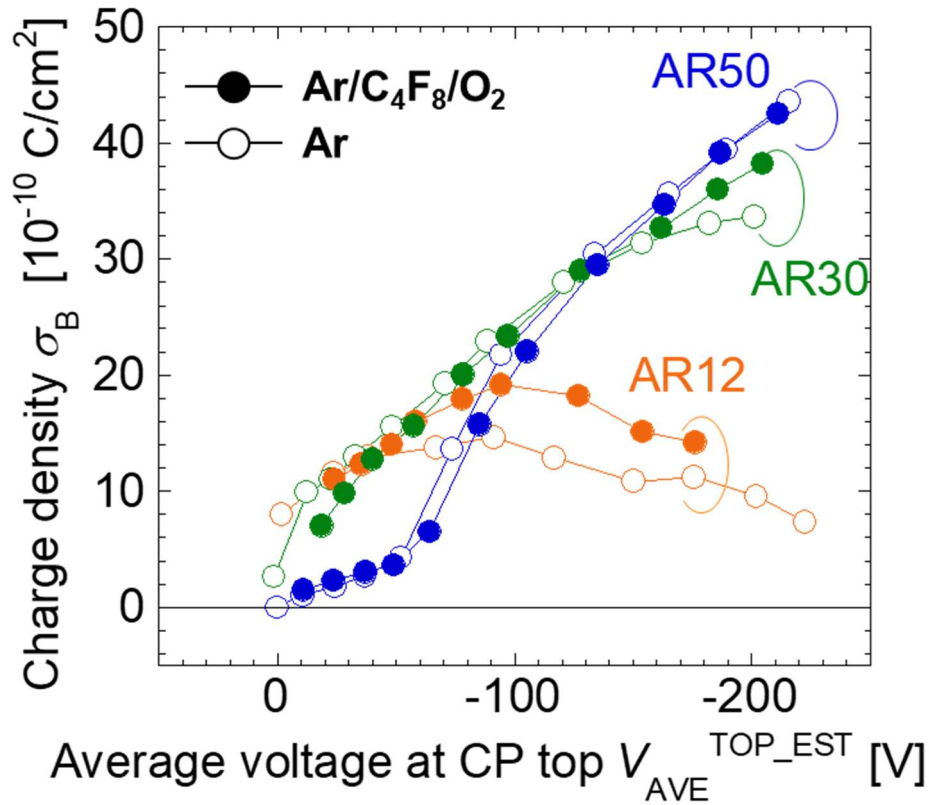


図 4-4 純 Ar プラズマ(図中○印)及び C₄F₈/O₂ 添加 Ar プラズマ(図中●印)における CP 底部面電荷密度の CP 上部自己バイアス($V_{AVE}^{TOP_EST}$)依存性。CP の AR は 12, 30, 50。

4.2.2 パルスプラズマと CW プラズマの電荷密度比較

AR=12 の CP を用い、パルス放電の VHF パルスオン定常時及び CW 放電における V_{AVE}^{BTM} の $V_{AVE}^{TOP_EST}$ 依存性を比較した結果を図 4-5 に示す。図において、白抜きプロットがパルス放電、塗潰しプロットが CW 放電である。パルス及び CW 放電に共通することは、共に低 $V_{AVE}^{TOP_EST}$ 領域において、 V_{AVE}^{BTM} がプラズマ電位程度で飽和しており、 $V_{AVE}^{TOP_EST}$ を増加すると V_{AVE}^{BTM} と $V_{AVE}^{TOP_EST}$ の CP 上部と底部の平均電位差(これを ΔV_{AVE} と定義する)をほぼ一定としたまま、 V_{AVE}^{BTM} と $V_{AVE}^{TOP_EST}$ とともに減少し

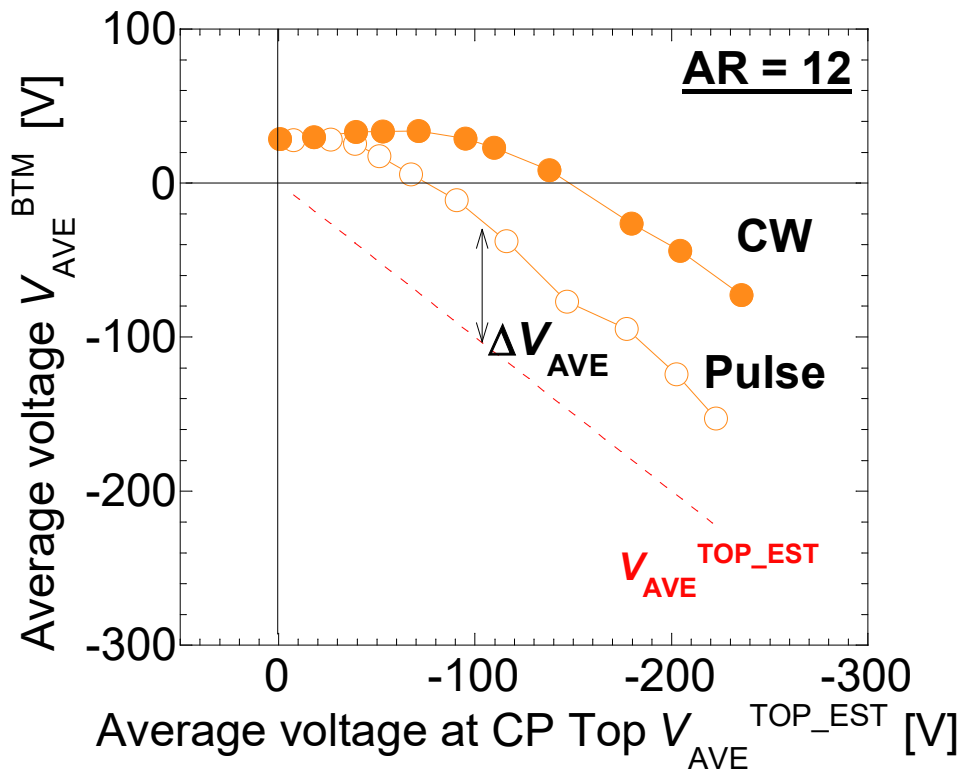


図 4-5 CW 放電及びパルス放電における AR12 の CP 底部平均電圧 V_{AVE}^{BTM} の $V_{AVE}^{TOP_EST}$ 依存性

ていく点である。一方、パルス放電と CW 放電の違いは、 ΔV_{AVE} が低下し始める $V_{AVE}^{TOP_EST}$ がやや異なる点と、保たれる ΔV_{AVE} の値が異なる点である。パルス放電において $V_{AVE}^{TOP_EST}$ が ~ 30 V から低下を開始するが、CW 放電においては、 ~ 70 V から低下し始める。また、 ΔV_{AVE} はパルス放電で約 80 V、CW 放電で ~ 150 V となり、CW 放電の方が大きな ΔV_{AVE} である。

次に、図 4-5 の結果をもとに、第 3 章の手法を用いて CP 底部面電荷密度 σ_B を算出した結果を図 4-6 に示す。図 4-5 と同様に、白抜きのプロットがパルス放電、塗潰しプロットが CW 放電となっている。なお、 $V_{AVE}^{TOP_EST}$ がおよそ 0V においても CP 底部がわずか ($\sim 5 \times 10^{-10} \text{ C/cm}^2$) な面電荷密度を持つのは、プラズマ電位程度のシー
ス電圧による CP 底部のチャージアップが生じるためと考えられる。また、この結果の大きな特徴は、特に $\sim -100 \text{ V}$ を超える $V_{AVE}^{TOP_EST}$ において、パルス放電時の σ_B が CW 放電の σ_B の半分程度まで減少していることである。これは、パルス放電によってパルスオフ時に蓄積電荷の緩和が
おこり、面電荷密度が減少しているためと考えられる。なお、 -100 V を超える高い $V_{AVE}^{TOP_EST}$ において σ_B が減少するという現象は放電が

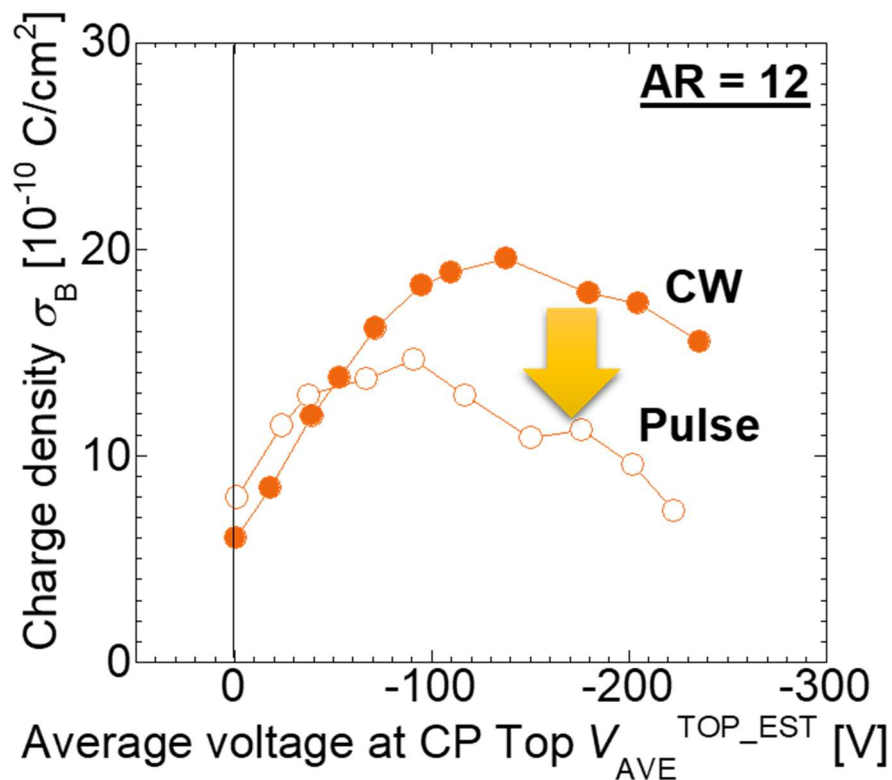


図 4-6 CW 放電及びパルス放電における AR12 の CP 底部表面電荷密度の $V_{AVE}^{TOP_EST}$ 依存性

パルス、CWにかかわらず起こっていることから、 σ_B の減少はVHF電力オフ時の電荷緩和では説明ができない。この原因としては、パルスオン時に負の荷電粒子がCP底部に流入している可能性があげられる。

4.2.3 キャピラリープレート近傍における荷電粒子の挙動

本章では、VHF単周波のパルス及びCWプラズマに着目し、ARが12から100までのCPにおける面電荷密度評価を行ってきた。以上の結果をもとに、CP底部の電荷挙動について、プラズマからRF電極までの一次元電位構造をもとに検討する。図4-7はプラズマ、シース、CP、アルミナ板およびRF電極間における電位の一次元分布を模式的に示している。各境界は、それぞれプラズマ-シース境界、CP上部、CP下部、アルミナ板-RF電極境界となっており、境界における平均電圧をそれぞれ V_P 、 $V_{AVE}^{TOP_EST}$ 、 V_{AVE}^{BTM} 、 V_{AVE}^{ELEC} とする。図4-7(a)はパルスオン時の電位構造分布概略図であり、ラングミュアプローブによる測定値より V_P は30V程度である。本実験装置のように、RF電極が整合器などの大きな静電容量を介して接地に接続されている場合、アルミナ板により覆われてプラズマから荷電粒子を受け取ることないため、RF電極の平均電圧 V_{AVE}^{ELEC} はほぼ0となる。VHF電力を投入し、プラズマが生成されると、CP上部は自己バイアスの形成により速やかに負にバイアスされる。この時、CP底部はCPとアルミナ板から成る2つの直列に接続された静電容量の分電圧による電位を持つことになり、 V_{AVE}^{BTM} はプラズマ電位より低くなることが考えられる。この場合、シースで加速され、 eV_S ($V_S = V_P - V_{AVE}^{TOP_EST}$)のエネルギーを持った正イオンは、CPの上部から下部にかけてのポテンシャル障壁($e\Delta V_{AVE}$)を越えることができるためCP底部に到達する。CP底部に到達した正イオンはCP底部に正の電荷蓄積を引き起こし V_{AVE}^{BTM} が増加する。 V_{AVE}^{BTM} の増加は ΔV_{AVE} を増加させイオンの減速に作用する。

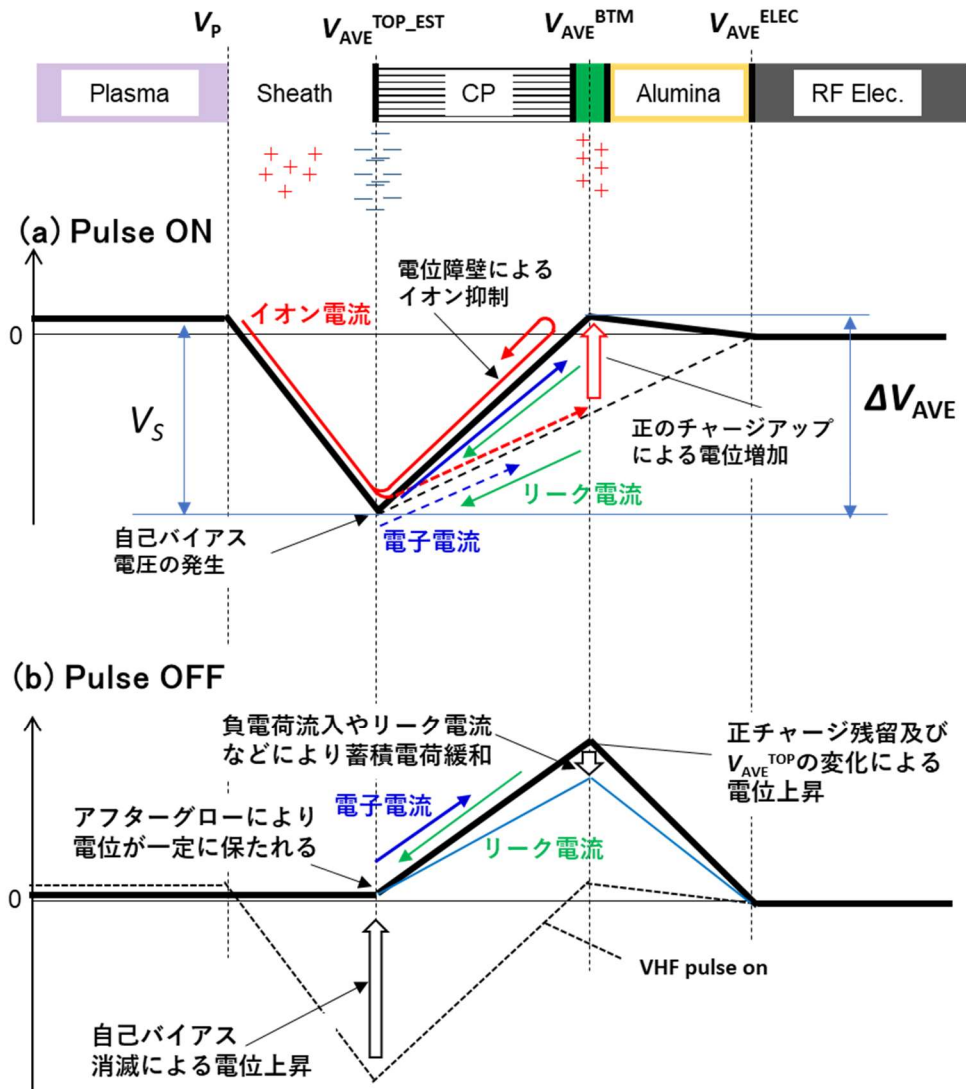


図 4-7 (a)パルスオン時及び(b)オフ時におけるプラズマから RF 電極までの一次元電位構造をもとにした電荷挙動考察

一方、 V_{AVE}^{BTM} の増加はプラズマから CP 底部への電子流入も示唆し、 ΔV_{AVE} はその値が増加するとともに電子加速に作用するため CP 底部への電子流入量が増えることが推測される。また、CP も有限の抵抗値を持ち ΔV_{AVE} の増大に伴って CP を介したリーク電流の増大も考えられる（詳細は第 5 章で述べる）。なお、 V_{AVE}^{BTM} がプラズマ電位 V_P に達すると、 $eV_S = e\Delta V_{AVE}$ となることから、イオン電流は急激に減少する。

図 4-7 (b)は VHF パルスオフ時の電位構造分布の概略である。このとき、CP 上部平均電圧 $V_{AVE}^{TOP_EST}$ は VHF パルスオフとなったのち速やかに減少し、アフターグロープラズマの存在によりほぼ 0 V に規定される。一方 CP 底部はホールによってプラズマと隔てられており、プラズマオフ時においては CP 上部のような大きな面電荷の変化が起こりにくい。したがって残留した正電荷と $V_{AVE}^{TOP_EST}$ の急激な上昇により、 V_{AVE}^{BTM} はパルスオフ時に急激に上昇する。しかしながら、アフターグロープラズマから CP 上部に到達した電子の一部は CP 底部に向かって加速され CP 底部へ流入し、わずかずつ蓄積正電荷の緩和に寄与する。また、アフターグロープラズマによりパルスオフ時の $V_{AVE}^{TOP_EST}$ はほぼ 0V であることから、CP 上部と底部間の抵抗によって発生するリーク電流も CP 底部蓄積正電荷の緩和に寄与すると考えられる。以上より、VHF パルスオフ時には電子電流とリーク電流による CP 底部の表面蓄積電荷の緩和が生じていると考えられる。

4.3 LF バイアス重畳時の電荷密度評価

4.3.1 パルス放電における CP 底部電荷密度の AR 依存性

次に、パルス VHF 電力同期させて LF 電力を重畳した際の結果について説明する。

図 4-8 に純 Ar プラズマにおける、(a)Type-1 セットアップを用いた CP 上部電極の測定電圧(V^{TOP})波形および平均電圧波形、(b)Type-2 セットアップを用いた CP 下部電極の測定電圧(V^{BTM})波形例およびその平均電圧波形を示す。この時の放電条件は $\text{AR} = 12$ 、VHF ピーク電力 400 W、ピーク LF 電力 100 W、パルス周波数 1 kHz、デューティ比 50% である。なお、実験においてパルスオン時の peak-to-peak 電圧 V_{PP} は VHF の V_{PP} と LF の V_{PP} が重なった波形の最大-最小値から評価している。まず CP 上部電圧図 4-8 (a) に着目する。CP 上部 peak-to-peak 電圧 $V_{\text{PP}}^{\text{TOP}}$ はパルスオン直後から 10 ~ 20 μs かけて増加し、その後 1.8 kV $_{\text{PP}}$ 程度で定常となる。なお、この $V_{\text{PP}}^{\text{TOP}}$ の増加は VHF 単周波における電圧増加時間と比較すると非常に遅い。また CP 上部平均電圧 $V_{\text{AVE}}^{\text{TOP}}$ は $V_{\text{PP}}^{\text{TOP}}$ と同様にパルスオン直後から約 30 μs かけて負バイアス電圧が増加し、その後 -650 V 程度で定常となる。このように LF 重畳時には VHF 単周波に比較して非常に強い負バイアス電圧が誘起されているが、これは LF の V_{PP} が VHF の V_{PP} に比べて高くなっているためである。次にパルスオフ時に注目すると、 $V_{\text{PP}}^{\text{TOP}}$ は約 50 μs 程度かけて減衰し、やがて 0 になることがわかる。 $V_{\text{PP}}^{\text{TOP}}$ の減衰時間は VHF 単周波のそれと比較して非常に長く、これも LF 電源及び整合器の特性に起因するものと思われる。一方、 $V_{\text{AVE}}^{\text{TOP}}$ は 30 μs 程度までは 0 V に向かって急速に減衰し、その後 100 μs 以上かけて 0 V になるまで減衰する。パルスオフ直後の $V_{\text{AVE}}^{\text{TOP}}$ の減衰は減衰しながらも存在する LF の V_{PP} にて発生する自己バイアスの減衰によるものであり、その後の $V_{\text{AVE}}^{\text{TOP}}$ の緩やかな減衰はアフターグロープラズマからの CP 上部への電荷流入による CP 上部面電荷の中和過程であると考えられる。

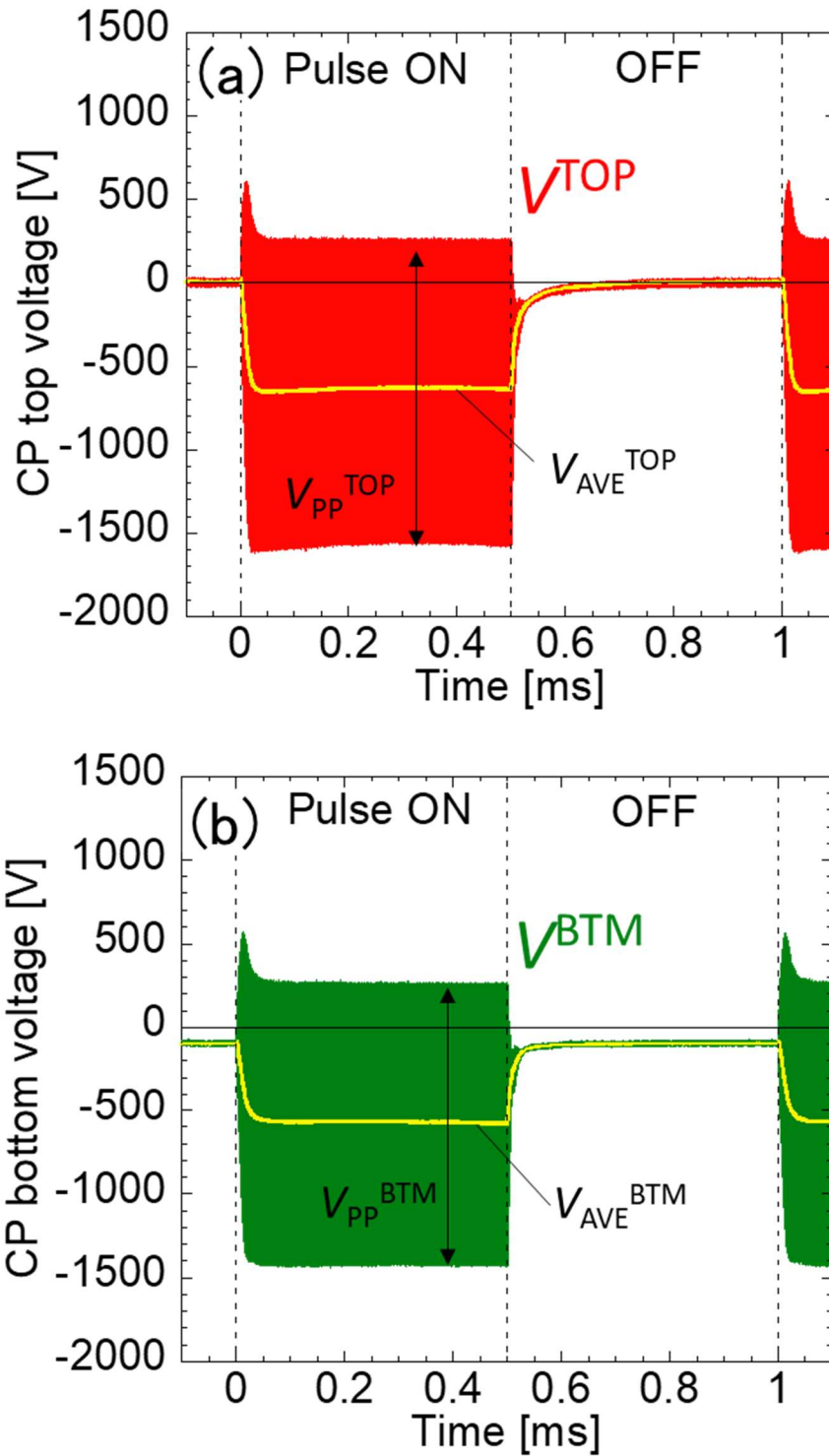


図 4-8 純 Ar プラズマ(AR = 12, VHF 電力 400 W, LF 電力 100 W)における(a) Type-1 セットアップの CP 上部電極の電圧波形及び(b)Type-2 セットアップの CP 下部電極の測定電圧波形

次に CP 底部電圧に着目する(図 4-8 (b))。まずパルスオン時をみると、 V_{PP}^{BTM} は V_{PP}^{TOP} と同様にパルスオン直後に $20 \mu s$ かけて増加し、その後 $1.8 kV_{PP}$ 程度で定常となる。一方、 V_{AVE}^{BTM} はパルスオン直後から約 $30 \mu s$ かけて負バイアスが増加し、その後パルスオフ直前で $-600 V$ 程度となる。一方、パルスオフ時に注目すると、 V_{PP}^{BTM} はと V_{PP}^{TOP} と同様に約 $50 \mu s$ 程度かけて減衰し、やがてゼロになることがわかる。 V_{AVE}^{BTM} に注目すると、 $30 \mu s$ 程度までは急速に電位が上昇し、その後 $-100 V$ でほぼ定常となる。急速な正方向への電位変化は $V_{AVE}^{TOP_EST}$ の電位変化に起因するものと考えられる。しかし、 V_{AVE}^{BTM} が $-100 V$ で飽和するのは、 $V_{AVE}^{TOP_EST}$ に起因するものだけでは説明できず、CP 底部に負の電荷が蓄積していると考えざるを得ない。

第3章で述べた手法を元に、定常時における $AR = 12$ 及び 50 の CP 底部の面電荷密度(σ_B)の $V_{AVE}^{TOP_EST}$ 依存性を図 4-9 にそれぞれ示す。図において●印および○印

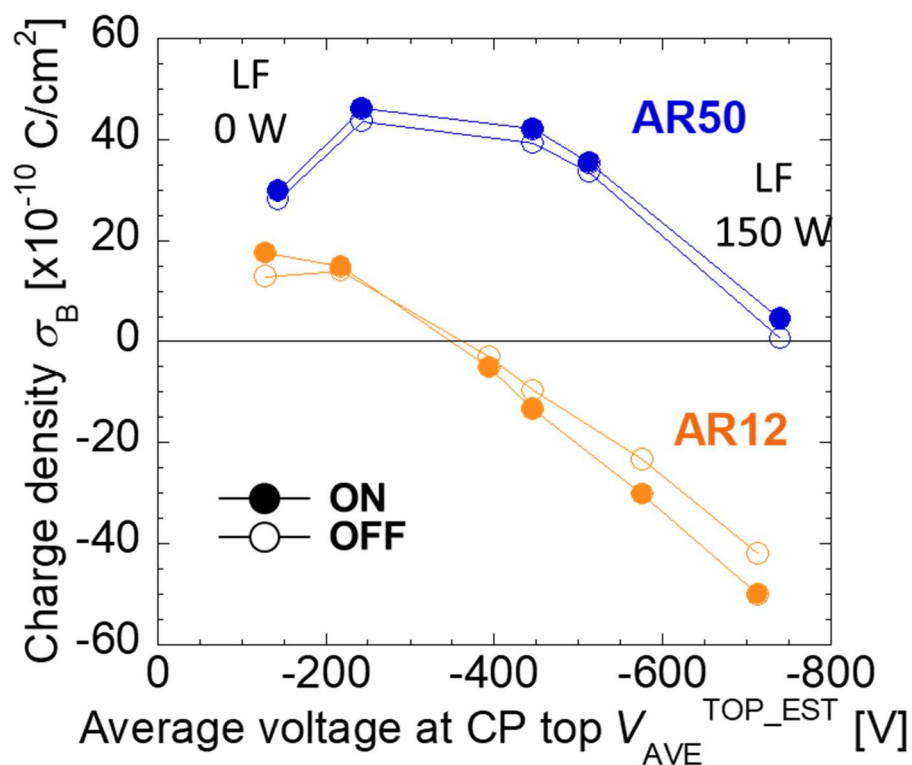


図 4-9 純 Ar プラズマ(VHF 電力 400W)における Type-2 セットアップの CP 下部電極の面電荷密度の自己バイアス電圧($V_{AVE}^{TOP_EST}$)依存性

はそれぞれパルスオン定常時およびパルスオフ定常時の結果である。放電ガスは純 Ar であり、圧力 2 Pa, VHF ピーク電力 400 W, パルス周波数 1 kHz でデューティ比が 50%とし、ピーク LF 電力は 0 から 150 W まで変化させた。まずパルスオン時の $AR = 12$ に注目すると、面電荷密度は $V_{AVE}^{TOP_EST} = -350V$ 程度まで正となり、さらにバイアスを強くすると面電荷密度は負に変化する。 $AR = 50$ では、LF バイアス電圧の増加に伴い一旦、面電荷密度が増加し、その後減少する。さらに $V_{AVE}^{TOP_EST} \sim -750 V$ においても正の面電荷密度となっているものの、結果を外挿すると $V_{AVE}^{TOP_EST} \sim -800 V$ 程度では負に帯電することが推測される。このことから、いずれの $AR = 12$ だけでなく $AR = 50$ の CP においても $V_{AVE}^{TOP_EST}$ が強い負電位となるとときに、CP 底部が負に帯電する可能性があることが示された。また、パルスオン時とオフ時を比べると、 $AR = 12, 50$ いずれの場合においてもパルスオフ時に正あるいは負の面電荷密度がわずかに緩和し減少している。これは正または負の電荷がパルスオフ時に何らかの原因にてわずかに失われていることを意味している。

図 4-10 にパルスオン定常時での純 Ar および C_4F_8/O_2 添加 Ar プラズマにおける CP 底部電荷密度(パルスオン時)の違いを比較した結果を示す。図において●印および○印はそれぞれ C_4F_8/O_2 添加 Ar および純 Ar プラズマであり、 $AR = 12$ と 50 それぞれの結果を示している。面電荷密度は AR によって $V_{AVE}^{TOP_EST}$ に対する依存性が大きく異なる。 $AR = 12$ では、純 Ar プラズマと C_4F_8/O_2 添加 Ar プラズマの面電荷密度の $V_{AVE}^{TOP_EST}$ はおよそ同じである。一方で $AR = 50$ においては純 Ar プラズマにおける面電荷密度より C_4F_8/O_2 添加 Ar プラズマにおける面電荷密度が高くなる。電気負性ガスである C_4F_8 の添加はプラズマ中の電子密度を大きく減少させるため、両者の面電荷密度の違いは電子密度の減少とそれに伴う CP 底部への電子フラックスの減少と考えることができる。 $AR = 12$ では、アスペクト比が小さく CP 底部に達する電子フラックスが十分に大きくパルスオン中に電子流入が停止する電位構造になるまで電

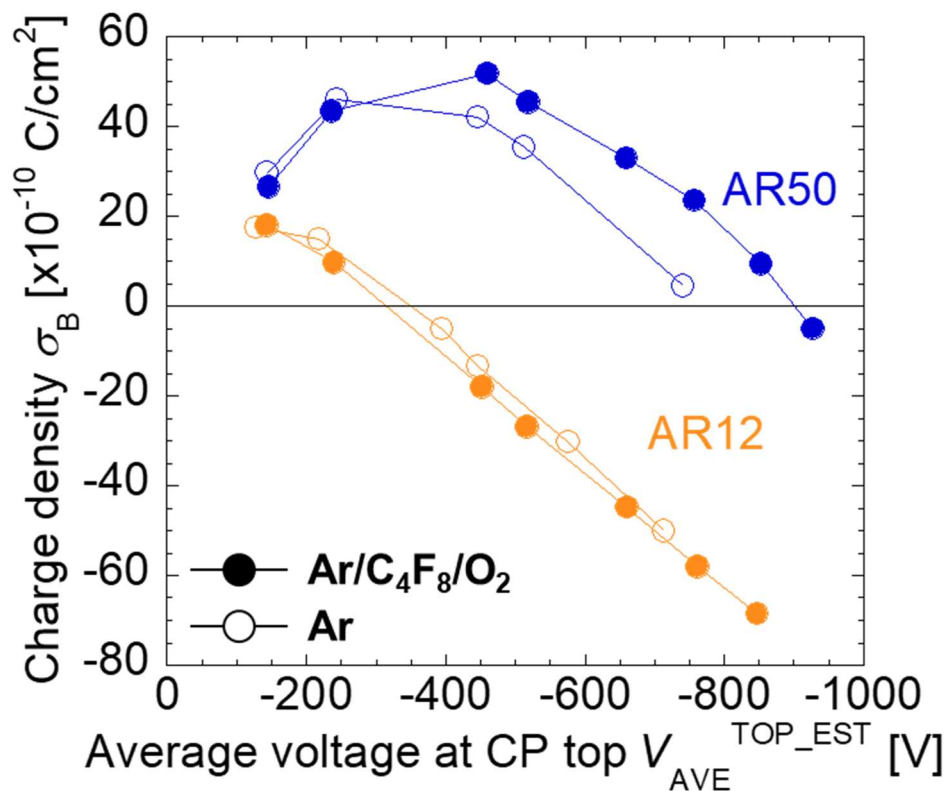


図 4-10 純 Ar プラズマ及び C $_4$ F $_8$ /O $_2$ 添加 Ar プラズマ(VHF 電力 400W)における Type-2 セットアップの CP 下部電極の面電荷密度の自己バイアス電圧($V_{AVE}^{TOP_EST}$)依存性

荷が変化するものの、AR = 50 ではアスペクト比が高いためにパルスオン時の CP 底部への電子流入が小さく、面電荷が正方向に変化するものと考えられる。

4.3.2 負の荷電粒子流入メカニズム

前節では VHF 電力と LF 電力を重畳したパルスプラズマに着目し、AR が 12 及び 50 の CP における面電荷密度評価を行った。興味深い点は強い負バイアスを誘起した場合に CP 底部は負にも帯電するという点である。この結果をもとに、CP 底部に負の荷電粒子が流入する機構について、プラズマから RF 電極までの一次元電位構造をもとに検討する。図 4-11 はプラズマ、シース、CP、アルミナ板および RF 電極間に

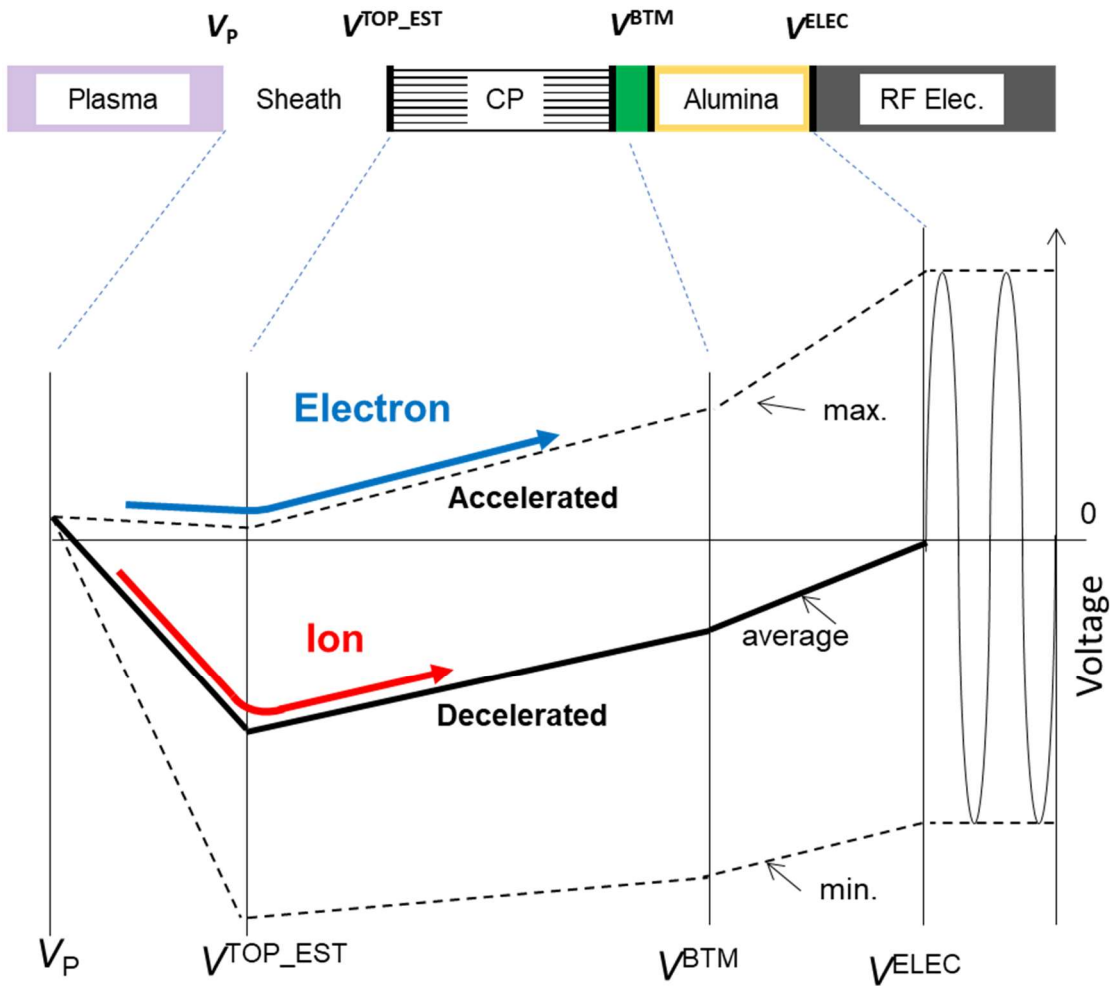


図 4-11 プラズマから RF 電極までの電位構造分布の模式図。実線は平均化された電位。破線は電位振動の最大ピークと最小ピークの電位プロット。イオンは平均的な電位障壁によって減速される。電子は最大ピークにおける瞬間的な電位構造によって加速される。

おける電位の一次元分布を模式的に示している。各境界は、それぞれプラズマ-シース境界、CP 上部、CP 下部、アルミナ板-RF 電極境界となっており、境界における電圧をそれぞれ V_p 、 V^{TOP_EST} 、 V^{BTM} 、 V^{ELEC} とする。このモデルでは RF 振動も考慮しており、実線は平均電圧 V_{AVE} を表し、上下の破線はそれぞれ RF 電極における電圧振幅の瞬時最大値と瞬時最小値を表す。

イオンは質量が大きいいため、およそ RF 振動によらない平均的な電位構造に伴う電界に作用すると考えられる。なお、 V_{AVE} の空間構造に対するイオンの挙動については 4.2.3 で示したとおりである。質量の大きいイオンに対し、質量の軽い電子は全く異なる挙動を示す。電子プラズマ周波数からも推測されるように電子の応答は非常に速い。電子密度 n 、電子質量 m 、素電荷量 e 、真空誘電率 ϵ_0 とすると、電子プラズマ周波数 ω_{pe} は

$$\omega_{pe} = \left(\frac{e^2 n}{\epsilon_0 m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

で表され[3]-[5]、例えば、 $n = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ において ω_{pe} は周波数にして 2.8 GHz に達する。これは今回用いた VHF 電源(40 MHz)及び LF 電源(2 MHz)の周波数より遥かに高い。このことから、電子はこれらの高周波振動に追従でき、瞬時電位構造に従うと考えられる。図 4-1 1 において、電子はプラズマ電位に対する V^{TOP} の電位差が電子温度程度となった時に CP 上部に流入することとなり、この時 CP 底部の瞬時電位が $V_{AVE}^{BTM} + 0.5V_{PP}^{BTM}$ となって CP 上部と下部の電位差にて電子が加速される。このことから、高周波瞬時最大電圧において電子が CP 底部到達できる可能性があることがわかる。

次に CP 底部が負に帯電する現象について考える。RF 振動の最大ピーク時を考えると、平均電圧と同様に CP 上部より CP 底部の電位が高くなるため電子は CP 上部から底部に向かって加速される。CP 上部に到達した電子の運動エネルギーは等方的な熱運動エネルギーであるため、RF 電力や自己バイアスに影響されない。そのため、CP 底部に到達する電子フラックスは CP 上部と底部の電位差だけで決まることが考えられる。CP 底部が帯電していない状態を想定すると、RF 電力を印加して生成されたプラズマ中において、CP 底部平均電圧は CP 上部平均電圧の静電容量による分圧によって決まる。この時の CP 上部と下部の電位差で決まる電子フラックスが、シー

スで加速されて CP を通過してくるイオンフラックスを上回るとき、CP 底部が負に帯電することがあると考えることができる。

最後に負イオンの挙動について考える。負イオンも電子と比較すると重い粒子であるため平均電位構造に従う。一方で CP 上部平均電圧 $V_{AVE}^{TOP_EST}$ はプラズマに対して負バイアスであるため、CP 上部に到達することが困難である。これは、電気負性ガスのプラズマが電子、負イオン及び正イオンで電気的中性を保つ電気的負性領域と電子と正イオンで電気的中性を保つ電気的 positive 領域とシース領域を持つ[5]ことから推測できる。そのため、パルスオン時において負イオンによる直接的な電荷の緩和は難しいと考えられる。

4.3.3 キャピラリープレート底部蓄積面電荷密度のパルスデューティー比依存性

これまでの結果からわかるように、パルス放電においてはプラズマオフ時に CP 底部蓄積電荷の緩和が起こる。これについてさらに知見を得るため CP 底部面電荷密度のパルスデューティー比に対する変化を調べた。図 4-1 2 にパルスデューティー比を CW からオンデューティー50%まで変化させたときの CP 上部および底部の電圧波形例を示す。Type-1 セットアップを用いて測定した CP 上部電圧について、(a)は CW、(c)はパルスデューティー比 80%、(e)はパルスデューティー比 50%の結果であり、Type-2 セットアップを用いて測定した CP 底部電圧について、(b)は CW、(d)はパルスデューティー比 80%、(f)はパルスデューティー比 50%の結果である。本測定に用いた CP は $AR = 100$ (直径 33 mm, 厚さ 1 mm, 穴径 10 μm) であり、放電条件はガス圧力 2 Pa で C_4F_8 を 27%、 O_2 を 13%混合した Ar プラズマ(VHF ピーク電力 200 W, LF ピーク電力 200 W, パルス周波数 1 kHz)である。

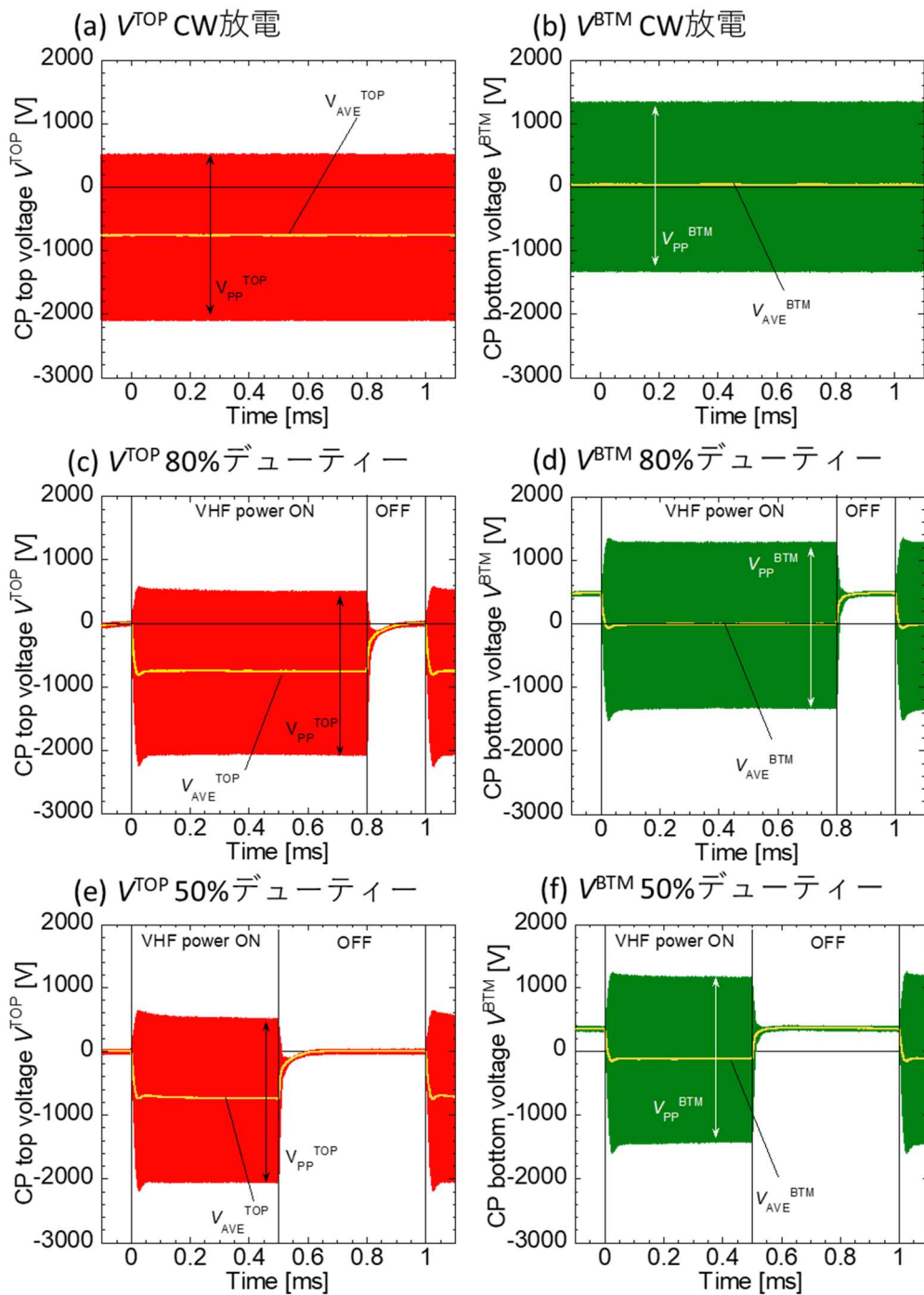


図 4-1 2 C_4F_8/O_2 添加 Ar プラズマ(VHF 電力 200 W, LF 電力 200 W)における(a)CW 放電の V^{TOP} , (b)CW 放電の V^{BTM} , (c)80%パルスデューティーの V^{TOP} , (d)80%パルスデューティーの V^{BTM} (e) 50%パルスデューティーの V^{TOP} 及び(f) 50%パルスデューティーの V^{BTM} の測定電圧波形とその平均電圧波形(AR = 100)

まず、CW 放電 (図 4-1 2 (a)(b)) では CP 上部下部におけるそれぞれの電圧は $V_{PP}^{TOP} \sim 2.6 \text{ kV}$, $V_{AVE}^{TOP} \sim -800 \text{ V}$, $V_{PP}^{BTM} \sim 2.7 \text{ kV}$, $V_{AVE}^{BTM} \sim 30 \text{ V}$ で、は時刻に対して変化はなくほぼ一定であることから各蓄積電荷は平衡している。次に、 $t = 0 \sim 0.8 \text{ ms}$ がパルスオンで $t = 0.8 \sim 1.0 \text{ ms}$ がパルスオフとなるパルスデューティ比 80% (図 4-1 2 (b)(c)) の場合、まず peak-to-peak 電圧に着目すると、CP 上部下部ともにパルスオン後に V_{PP}^{TOP} および V_{PP}^{BTM} はややオーバーシュートした後 $t \sim 0.1 \text{ ms}$ で定常となる。この時 $V_{PP}^{TOP} \sim 2.6 \text{ kV}$, V_{PP}^{BTM} は V_{PP}^{TOP} よりやや大きい $\sim 2.7 \text{ kV}$ となり、両者ともに CW の場合とほぼ同じ値を示す。次に、パルスオン時の平均電圧に着目すると CP 上部 V_{AVE}^{TOP} は定常時において $\sim -800 \text{ V}$ で CW の場合と同程度である。一方、CP 下部平均電圧 V_{AVE}^{BTM} は $\sim 0 \text{ V}$ となる。さらに、パルスオフ後の平均電圧は V_{AVE}^{TOP} がほぼ 0 V に落ち着く一方で、 $V_{AVE}^{BTM} \sim 450 \text{ V}$ まで上昇する。このことから、CP 底部には相当量の電荷が蓄積しているものと推測できる。

さらにオフデューティを延ばし $t = 0 \sim 0.5 \text{ ms}$ がパルスオン、 $0.5 \sim 1.0 \text{ ms}$ がパルスオフであるパルスデューティ比 50% の場合 (図 4-1 2 (c)(f))、パルスオン定常時 CP 上部および下部 peak-to-peak 電圧は $V_{PP}^{TOP} \sim 2.6 \text{ kV}$ および $V_{PP}^{BTM} \sim 2.7 \text{ kV}$ 、パルスオン定常時 CP 上部平均電圧 V_{AVE}^{TOP} は $\sim -800 \text{ V}$ であり、これらは CW プラズマと同様である。しかしながら、パルスオン定常時 CP 下部平均電圧はデューティ比が 50% においてさらに低下し、 $V_{AVE}^{BTM} \sim -150 \text{ V}$ 程度となっている。さらに、パルスオフ定常時の V_{AVE}^{BTM} は $\sim 350 \text{ V}$ となり、パルスデューティ比 80% に比べて電圧が低下している。このことから、パルスオフデューティを延ばすことにより、CP 底部蓄積電荷が緩和していると推測できる。

図 4-1 3 に CW 放電及びパルスオン定常時における Type-2 セットアップにおける CP 上部推定平均電圧 ($V_{AVE}^{TOP_EST}$) に対する CP 底部の測定平均電圧 (V_{AVE}^{BTM}) の変化を示す。放電条件は図 4-1 2 と同様であり、VHF 電力は一定とし、LF 電力を 0 か

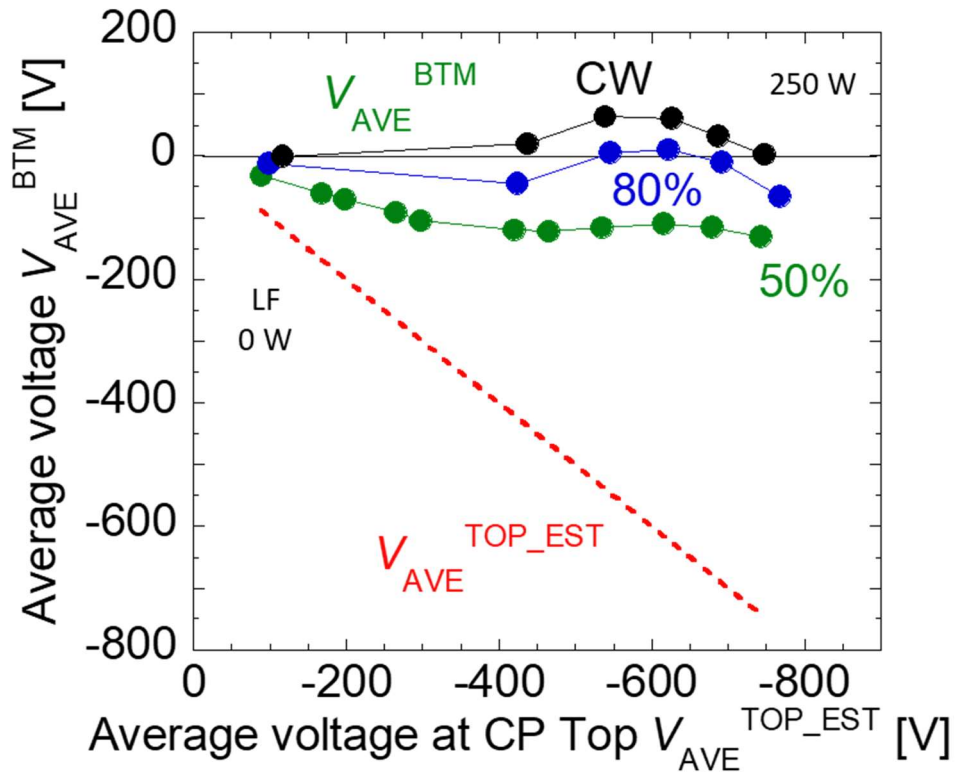


図 4-1 3 CW 及びパルスオン定常時における C_4F_8/O_2 添加 Ar プラズマ (VHF 電力 200 W, LF 電力 200 W) における Type-2 セットアップの $V_{AVE}^{TOP_EST}$ に対する V_{AVE}^{BTM} のパルスデューティー比依存性 (AR = 100)

ら 250 W まで変化させた。まず, CW 放電においては $V_{AVE}^{TOP_EST} \sim -550$ V のとき V_{AVE}^{BTM} は 150V で最大となり, さらに LF 電力を増加させると V_{AVE}^{BTM} は減少する。パルスデューティー比 80% では V_{AVE}^{BTM} の最大値は 10V であり CW に比べて減少し, またピークを示す $V_{AVE}^{TOP_EST}$ はやや大きく ~ -600 V となる。パルスデューティー比が 50% になると, V_{AVE}^{BTM} のピークは顕著に見えなくなり, $V_{AVE}^{TOP_EST}$ が -500 V 程度まで V_{AVE}^{BTM} が低下した後, わずかに上昇してさらに低下する。 V_{AVE}^{BTM} の正電位方向へのシフトは CP 底部への正電荷蓄積を示すと考えられることから, パルスオフデューティーを延ばすことにより, CP 底部蓄積電荷の緩和が起こっていることがわかる。

次にパルスオフ定常時に着目する。図 4-1 5 はパルスオフ定常時における Type-

2 セットアップにおける CP 上部推定平均電圧($V_{AVE}^{TOP_EST}$)に対する CP 底部の測定平均電圧(V_{AVE}^{BTM})の変化を示す。放電条件は図 4-1 2 と同様である。 $V_{AVE}^{TOP_EST}$ が-700 V 程度までは V_{AVE}^{BTM} が単調増加し、その後飽和する傾向がみられる。また、パルスデューティー比 50%, 80%ともに、 $V_{AVE}^{TOP_EST}$ が-450 V 程度まで線形増加し、その後増加が顕著になっている。

以上の結果と第3章で述べた手法を用いて $AR=100$ の CP 底部の面電荷密度(σ_B)の $V_{AVE}^{TOP_EST}$ 依存性を図 4-1 4 に示す。図において●印および○印はそれぞれパルスオンおよびオフ定常時の結果を示しており、放電条件は、 C_4F_8 27%, O_2 13%それぞれ添加したガス圧力 2 Pa の Ar プラズマで、VHF ピーク電力 400W, ピーク LF 電力は 0 から 250 W, パルス周波数 1 kHz としている。パルスオンおよびオフ定常時の面電荷密度を比較してみると、 $V_{AVE}^{TOP_EST} \sim -450$ V まではデューティー比にかかわらずパルスオンおよびオフに対する面電荷密度の違いは小さく、一方で $V_{AVE}^{TOP_EST}$ が-400 V 以降では、パルスオフの面電荷密度はパルスオンと比較して減少している。

残念ながら、定常値のみでは、荷電粒子流入量の評価は難しい。

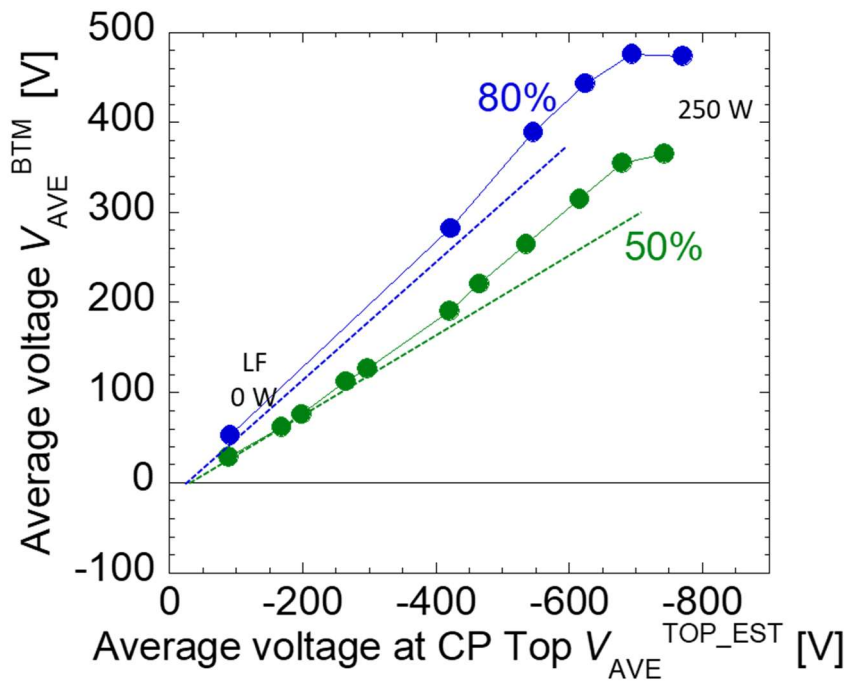


図 4-15 パルスオフ定常時における C_4F_8/O_2 添加 Ar プラズマ(VHF 電力 200 W, LF 電力 200 W) における Type-2 セットアップの $V_{AVE}^{TOP_EST}$ に対する V_{AVE}^{BTM} のパルスデューティ比依存性 (AR = 100)

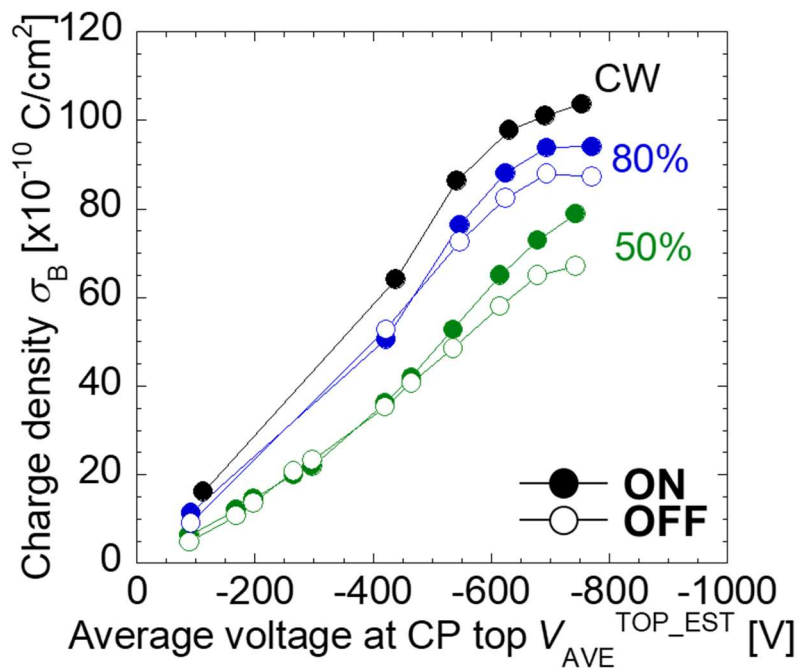


図 4-14 C_4F_8/O_2 添加 Ar プラズマ(VHF 電力 200 W, LF 電力 200 W) における $V_{AVE}^{TOP_EST}$ に対する CP 底部面電荷密度のパルスデューティ比依存性 (AR = 100)

4.4 まとめ

本章ではパルスプラズマ中におけるパルスオンとオフの定常状態における電圧に注目してホールのアスペクト比や印加電力に対する面電荷密度の評価をおこない、電荷の挙動を考察した。まず VHF 単周波における面電荷密度を評価したところ、VHF 電力 (CP 上部の自己バイアス電圧) に対して、CP 底部に電荷蓄積が殆ど起こらない傾向、正の面電荷蓄積が生じる傾向、正の面電荷密度が減少する傾向、が存在することを示した。特に面電荷密度が減少する傾向については、CW 放電とパルス放電の比較によって、パルスオン時においても CP 底部に負の荷電粒子が流入する可能性を示唆する結果が得られた。さらに LF 電力を重畳し CP 上部により強い負バイアスを誘起することで、高アスペクト比ホール底部において、負の電荷蓄積が起こることを示した。これは従来の考え方を覆す興味深い知見である。

参考文献

- [1] 小郷 寛, 小亀 英己, 石亀 篤司: 基礎からの交流理論 (電気学会, 2012).
- [2] 白藤 立: 電気回路基礎 (プレアデス社, 2018).
- [3] F. F. Chen, J. P. Chang: LECTURE NOTE ON PRINCIPLES OF PLASMA PROCESSING (Springer, 2013).
- [4] 菅井 秀郎: プラズマエレクトロニクス (オーム社, 2009) p.115.
- [5] M. A. Lieberman, A. J. Liebtenberg: Principles of Plasma Discharge and Materials Processing (WILEY, 2005).

第5章 パルス放電におけるキャピラリープレート底部の電荷密度時間分解測定

5.1 はじめに

前章では CP 上部および底部の平均電圧測定と等価回路モデルをもとに、パルス VHF 放電およびパルス VHF-LF 重畳放電を対象として、パルスオンおよびオフの定常状態における CP 底部の蓄積電荷の絶対評価をおこなった。そして、パルス放電時においてパルスオフデューティが電荷緩和に寄与していることを確認するとともに、VHF あるいは LF 電圧に対する蓄積電荷の変化もパルス放電と CW 放電で異なることを示した。しかしながら、この測定はオンおよびオフデューティのそれぞれ最後の時刻のみに着目して評価をおこなったものであり、時間変化に関する情報がない。電荷の蓄積過程あるいは緩和過程を明らかにするには、電荷量の経時変化を詳細に調査することが有効であることから、本章ではパルス放電時における CP 底部面電荷密度の変化に着目した結果について述べる。CP のアスペクト比が蓄積電荷の時間変化および定常状態における蓄積電荷量にどのように影響するかを示すとともに、主にパルスオフ時における蓄積電荷の緩和過程について、リーク電流やホール内を通過するアフターグロープラズマからの電子電流に着目して議論する。

5.2 電荷密度時間変化の電力依存性

図 5-1 にパルス変調 VHF プラズマにおける CP 底面の電圧波形例を示す。CP のアスペクト比は 30、VHF ピーク電力は 200 W、パルス周波数 1 kHz、パルスデューティ

ィー比 50%である。ここで、 $t=0$ と 0.5 ms はそれぞれパルスの VHF 電力がオンおよびオフとなるタイミングである。VHF パルスオン時は VHF 電圧最大値および最小値が $+193\text{ V}$ および -115 V である。VHF パルスオフ時には 40 MHz の電圧振動は消失し、CP 上部の電位が 0 V となることにより、CP 底部電圧は $\sim 120\text{ V}$ まで上昇する。

図 5-1 の結果から 40 MHz 成分を除去した CP 上部と底部の平均電圧 $V_{\text{AVE}}^{\text{TOP_EST}}$ および $V_{\text{AVE}}^{\text{BTM}}$ を図 5-2 に示す。 $V_{\text{AVE}}^{\text{BTM}}$ は、VHF パルスオン時、オフ時ともに $V_{\text{AVE}}^{\text{TOP}}$ よりも高い値を示している。 $V_{\text{AVE}}^{\text{TOP_EST}}$ と $V_{\text{AVE}}^{\text{BTM}}$ の時間依存性が互いに似ていることから、 $V_{\text{AVE}}^{\text{BTM}}$ は $V_{\text{AVE}}^{\text{TOP}}$ によって誘起される電界の影響を受けていることがわかる。また、第 4 章で述べたように $V_{\text{AVE}}^{\text{TOP}}$ に対する $V_{\text{AVE}}^{\text{BTM}}$ の正の電位差は、CP 底部に正電荷が蓄積されたことを示している。さらに $V_{\text{AVE}}^{\text{BTM}}$ の時間変化を詳細にみると興味深い特徴がみられる。まず VHF パルスオフ時に着目すると、 $V_{\text{AVE}}^{\text{BTM}}$ はパルスオフ後

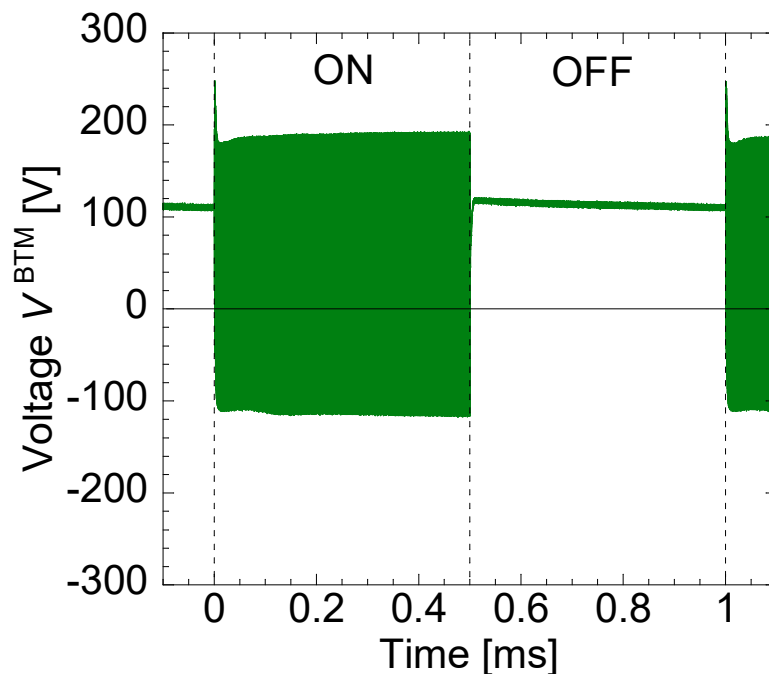


図 5-1 パルス変調された VHF Ar プラズマにおける CP 下部電極の代表的な波形。AR は 30 で、VHF 電力は 200 W である。

一旦～120 V まで急激に増加した後、ゆっくりと電圧が低下する。また VHF パルスオフ時には、一旦 V_{AVE}^{BTM} が急激に低下した後わずかな電圧上昇が見られる。これらの電圧変化の挙動は V_{AVE}^{TOP} ではみられず V_{AVE}^{BTM} 特有の挙動であり、これは CP 下部電極に蓄積された電荷の放電や充電の影響を受けていることが示唆される。

蓄積電荷の時間依存性を調べるため、第3章で述べた手法を各平均電圧時系列変化に適用し、面電荷密度 σ_B の時間変化を求めた結果を図 5-3 に示す。CP の AR は 30 および 50 であり、それぞれ青線および赤線で示している。また、VHF 電力は 50 W から 400 W まで変化させた。他の条件は図 5-1 の際と同じである。AR = 30, 50 とともに VHF 電力の増加と共に面電荷密度は増大する。AR = 50 では VHF 電力 50 W においては電荷蓄積が極めて少なく、100 W においても AR = 30 より低い。一方、150 W になると AR=50 の面電荷密度が急激に増加し、AR = 30 と同程度になる。さらに VHF 電力

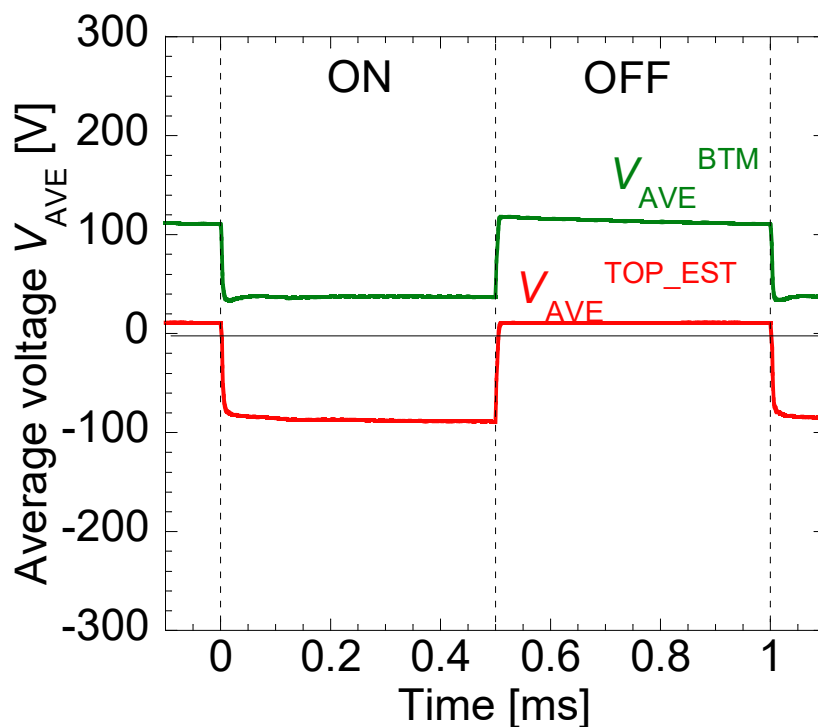


図 5-2 図 5-1 の 40 MHz の電圧発振を除去した後の CP 底部の平均電圧 (V_{AVE}^{BTM}) と、 V_{pp}^{BTM} から評価した CP 上部の推定平均電圧 ($V_{AVE}^{TOP_EST}$)。

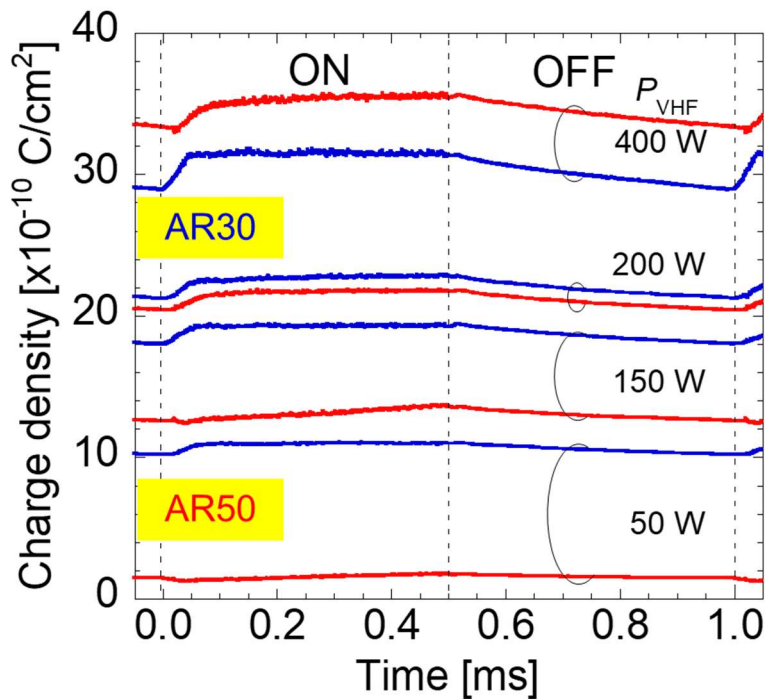


図 5-3 CP 底部面電荷密度時間変化の VHF 電力依存性。VHF 電力は 50 から 400 W であり，使用した CP の AR は 30 (青いプロット) と 50 (赤いプロット) である。

を高めると，AR = 50 における面電荷密度が AR = 30 より高くなる。このように AR = 50 では面電荷密度の変化に緩急があり，これはパルスオン時におけるチャージアップ電流とパルスオフ時における蓄積電荷の緩和の大小関係によるものだと考えられるがこれは後程議論する。

次に，AR = 30，VHF 電力 400 W における面電荷密度の時間変化を例に，パルスオン時とパルスオフ時の面電荷密度の時間変化図 5-4 を見ると，パルスオン時にはチャージアップ，パルスオフ時には電荷緩和がそれぞれ明瞭に観察される。この後，パルスオン時に CP 底部に電荷が蓄積していく時間帯を①チャージアップ領域，その後の面電荷密度が比較的定常化する時間帯を②定常領域，パルスオフ時に面電荷密度減衰する時間帯を③放電領域，とそれぞれ定義する。

各 AR においてパルスオン時の①領域をみると、およそどの条件においてもチャージアップはパルス周期よりも非常に速く、 ~ 0.1 ms 程度で領域②に移る。なお、AR = 50 の場合、VHF 電力 50 W 及び 150 W では領域①のチャージアップがパルス周期よりも非常に緩やかであるため領域②が存在しなかった。これは CP 底部に流入する正電流が極めて小さく、パルスオン時間内に定常状態まで達していないことを示している。この原因として、高 AR かつ CP 上部の低自己バイアス電圧(低 $V_{AVE}^{TOP_EST}$)時においてイオンが CP 底部に到達できないと考えられる。次に、パルスオフ時における電荷緩和(領域③)に着目すると、電荷緩和はどの AR および VHF 電力の条件においても非常に遅く、パルスオフ時間内に完全な電荷消失に至っていない。これらの結果から、VHF 電力が低く AR が 50 の場合にのみ、時間平均的な n_B が非常に低くなる原因は、パルスオン時のチャージアップ電流がパルスオフ時の放電電流と同程度に低く、CP 底部に十分な電荷蓄積がなされないためであると結論づけることができる。

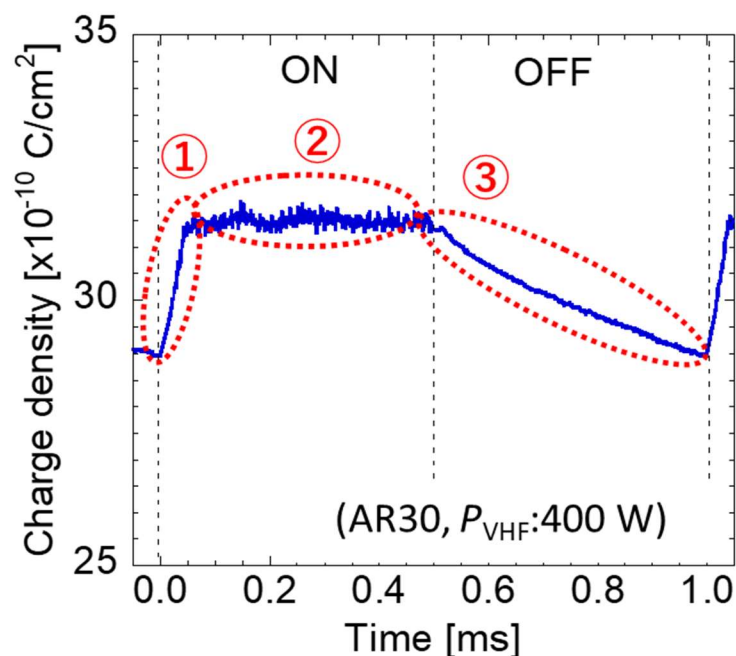


図 5-4 CP 底部面電荷密度時間変化における特徴的な 3 つの領域(AR = 30, VHF 電力 400 W)

5.3 リーク抵抗を含めた等価回路構築

第3章で示した等価回路モデルにおいては、CP自身の持つCP上部-下部間のリーク抵抗がCPの静電容量から求められるリアクタンスよりも極めて大きく、無視できるものとした。しかしながら、パルスオンやオフ時においては、その時間スケールが長いので、リーク抵抗による電荷量の変化がより顕著に現れることとなる。そこで、電荷蓄積や緩和の時間変化挙動を理解するために、改めて図5-5に示すプラズマからRF電極までの一次元電位構造モデルを想定し、CP上部、下部に流れる電流を考察する。図5-5(a)はVHFパルスオン時の電位構造分布であり、CP上部は自己バイアスによって負の電位($V_{AVE}^{TOP_EST}$)を持ち、CP底部は正イオンによるチャージアップによりCP上部より ΔV_{AVE} だけ高い電位(V_{AVE}^{BTM})を持つ。この時、プラズマからはシースで加速された正イオンがCP上部から下部に向かって流入する。また、第4章で述べたように、RF電圧瞬時最大値(シースが最も薄くなる)付近においてCP上部近傍に存在する電子がCP底部に向かって加速されながら流入する。一方、CPの上部と底部間には ΔV_{AVE} の電位差があるため、CPのもつリーク抵抗によりリーク電流が発生することが考えられる。

図5-5(b)はVHFパルスオフ時の電位構造分布であり、CP上部電圧はアフターグロープラズマの影響でほぼ0V、CP底部は正の蓄積電荷により正電位となる。この電位構造の場合、アフターグロープラズマからCP底部への電子流入が考えられるが、正イオンは自己バイアスによるイオン加速がないため ΔV_{AVE} の電位障壁を超えることができずCP底部への流入は難しい。一方、この電位構造においてもCP上下部間には ΔV_{AVE} が存在するためCPリーク抵抗を介したリーク電流が生じることが考えられる。

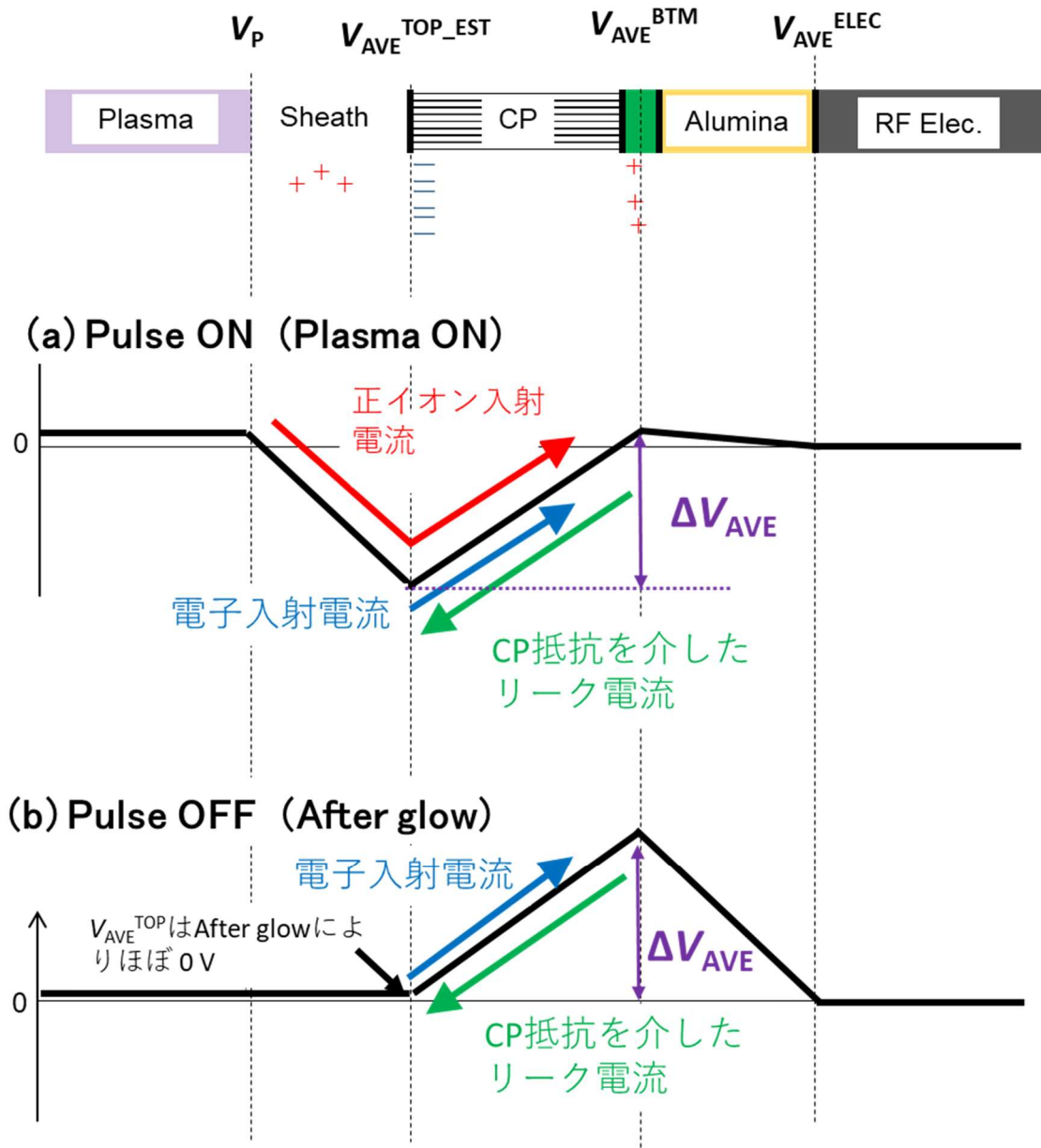


図 5-5 プラズマから RF 電極までの電位構造を基にした、(a)VHF 電力オン時及び (b)VHF 電力オフ時の電荷移動。

以上の想定される電流を考慮し、リーク抵抗と CP ホール通過電流を考慮した等価回路モデルを提案する。図 5-6 (a)はホール近傍の構造概略図である。図 5-6 (b)は、概略構造図に照らし合わせながら示したパルスオン時の等価回路を示しており、

ここで C_{CP} は CP 上下面間の実効静電容量, C_{ALM} はアルミナ板の実効静電容量, また C_A は高電圧プローブ及びフィードスルーの対接地浮遊容量であり, それぞれ 48 pF, 22 pF, 6.6 pF であることは第 3 章で述べた。本研究で使用した CP は鉛ガラス製であり, 高抵抗ではあるがわずかの電流を流すリーク抵抗を有しているため, その抵抗値を R_{CP} とした。また高電圧プローブに流入するリーク電流も考慮するため, 高電圧プローブの入力抵抗(100 M Ω)を R_A とした。また, 図に示す電流源は, プラズマ中の荷電粒子(イオン, 電子)が CP ホールを通過して CP 下部に流れ込む電流を模擬している。さらに, CP 上部に接続された電圧源は, パルスオン時の負の自己バイアス電圧を示している。なお, CP 底部への高エネルギーイオン電流と電子電流は CP 底部電圧によりそれぞれ減速および加速される。イオン電流及び電子電流は VHF 位相に応じて変化するため, 電流源で模擬される電流は平均化された正味の電流と考えられ, その値はプラズマ密度だけでなく, CP 上部と底部の電圧にも依存する。

図 5-6(c)はパルスオフ時の等価回路を表し, CP の抵抗, 実効静電容量, アルミナ板の実効静電容量, 及び高電圧プローブの入力抵抗と浮遊容量はパルスオン時の等価回路と同じである。(b)と異なる点はアフターグロー時の CP 上部電圧 $V_{AVE}^{TOP_EST}$ をほぼ 0 としている点である。また, ホールを通過する荷電粒子を模擬した電流源はアフターグロー時のプラズマ密度減衰時定数より長い時間スケールではその電流をほぼ 0 とすることができる。

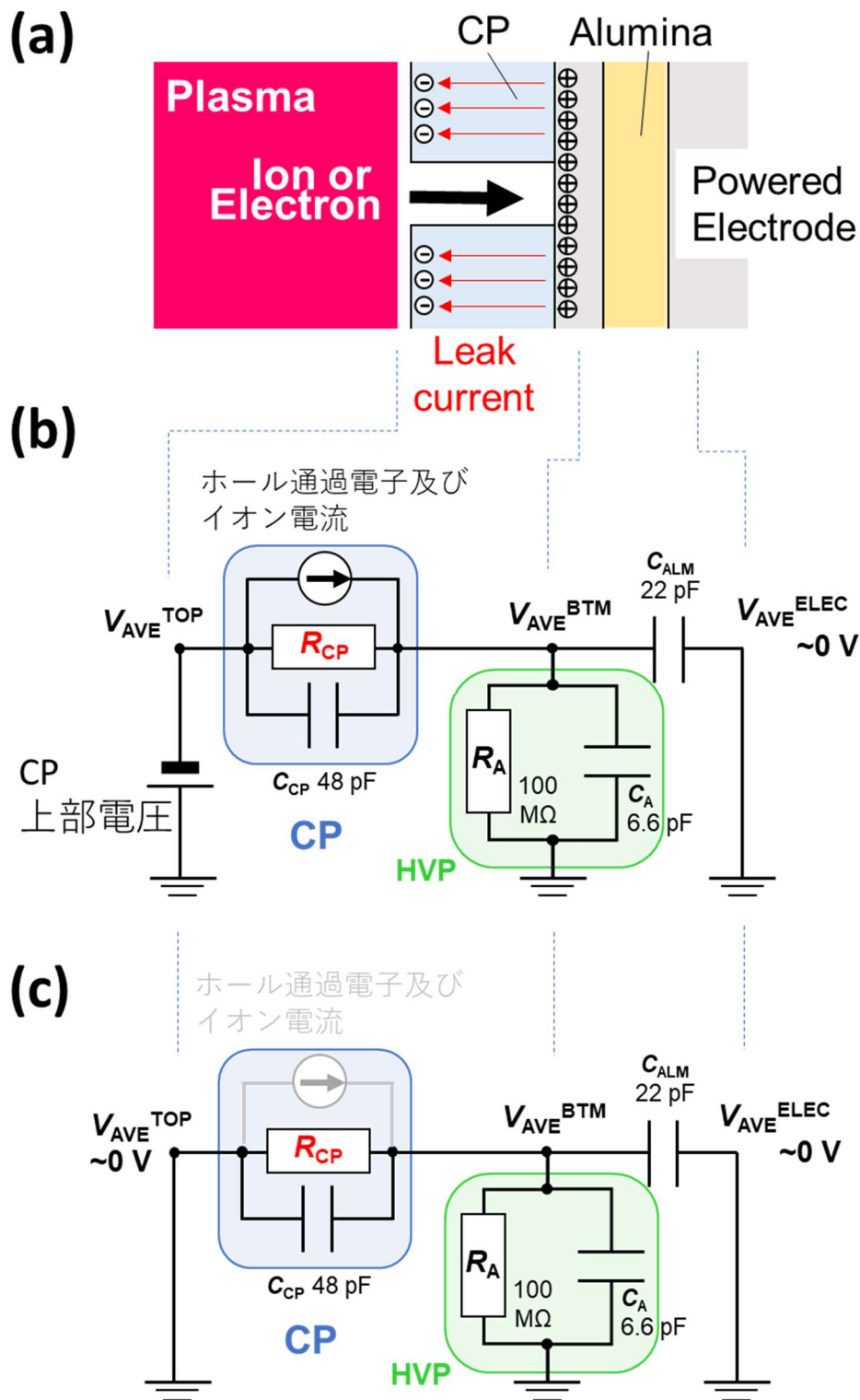


図 5-6 (a)CP 近傍の構造物モデルを基にした, (b)プラズマオン時および(c)プラズマオフ時の流入電流及びリーク抵抗を考慮した等価回路モデル。図中の静電容量は $AR = 12, 30, 50$ の CP を想定。

このモデルの妥当性、特に CP リーク電流を確認するために、図 5-4 に③で示した電荷減衰領域に着目し、電荷減衰挙動を調べた。自己バイアス電圧が消失した後の CP 上部から電源電極までの電位空間分布は前述の図 5-5 (b)に示した通りであり、CP 上部と RF 電極の電圧は、パルスオン時の条件によらずそれぞれ $\sim 10\text{ V}$ 、 $\sim 0\text{ V}$ であることが実験より確認されている。また、CP 底面に蓄積された電荷は、CP 上底部間に ΔV_{AVE} の電位差を生じる。等価回路モデルより、CP 上-底部電位差が ΔV_{AVE} となるとき、CP 底部電荷は等価回路においては C_{CP} 、 C_{ALM} 、 C_A の並列静電容量に蓄積される。パルスオフ時の CP 上部電圧 V^{TOP_EST} は、アフターグロープラズマの存在により 0 V にはならないが、パルスオフ時に $\Delta V_{AVE} \gg V_{AVE}^{TOP_EST}$ とすれば、パルスオフ直後に CP 底部から流出する電流(I_0^{OFF})は、CP 上部が接地されていると近似して

$$I_0^{OFF} = \frac{C}{\tau} \Delta V_{AVE} = \frac{R_A + R_{CP}}{R_A \cdot R_{CP}} \Delta V_{AVE} \quad (5.1)$$

のように記述される[1]-[3]。ここで C は並列の C_{CP} 、 C_{ALM} 、 C_A による合成静電容量、 R_A 、 R_{CP} は高電圧プローブの入力抵抗および CP 上下面間のリーク抵抗であり、 τ は等価回路中の RC 時定数である。図 5-7 の緑プロットは $AR = 30$ 、パルスオン時の $V_{AVE}^{TOP_EST} = -155\text{ V}$ において、③領域での CP 底部面電荷密度の時間変化測定結果である。この結果をよく見るとパルスオフ後の速い減衰とそれに引き続く遅い減衰を示している。等価回路モデルでは、面電荷密度は合成静電容量とリーク抵抗から決まる時定数によって指数関数的に減少することから、ゆっくりとした減衰($t > 0.8\text{ ms}$)に着目して、実験結果に対して最小二乗法によって指数関数曲線を求めた結果が図の赤破線である。なお、 $t = 0.5 \sim 0.7\text{ ms}$ における実験結果との差は、パルスオフ後の早い減衰成分を示している。これはアフターグロープラズマから CP 底部に流れ込む電子電流によるものであり、後に詳述する。

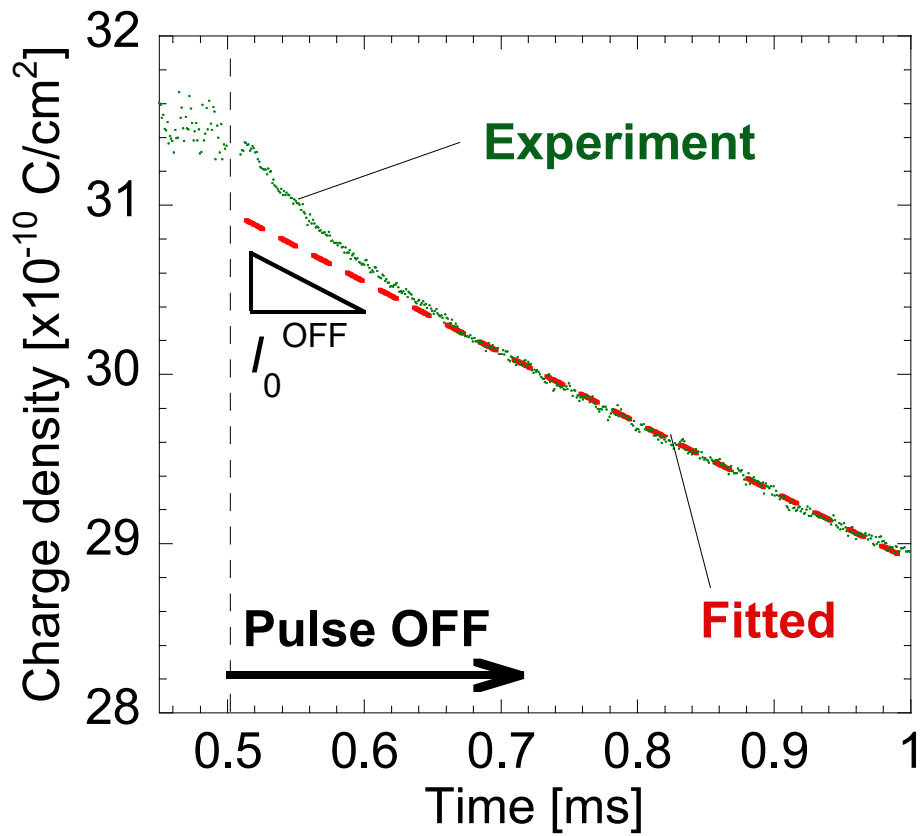


図 5-7 パルスオフ時の CP 底部電荷の減衰。AR は 30, $V_{\text{AVE}}^{\text{TOP_EST}}$ は -254 V。小さな点は実験結果、破線は $t=0.7\sim 1.0$ ms の実験データを用いた指数関数回帰曲線を示している。

実験結果に対して最小二乗法によって求めた指数関数曲線の $t = 0.5 \text{ ms}$ における電流の傾きから I_0^{OFF} を求め、そこから、厚さ(0.3 mm)、面積(4.9 cm²)、CP ホールの開口率 (~60%) を考慮した電流密度 J_0^{OFF} が得られる。図 5-8 に ΔV_{AVE} に対する J_0^{OFF} の測定値を示す。電流密度 J_0^{OFF} は ΔV_{AVE} にほぼ比例する。 R_A は一定であることから、この結果から CP 抵抗 R_{CP} は R_A に関係なくほぼ同じであることがわかる。本測定で使用した $AR = 12$ から 50 の CP は同じ直径、有効径、開口率、厚さのため、抵抗率と静電容量は同様であると考えられる。図 5-8 の結果を線形近似した直線の傾きから、 R_{CP} と R_A の並列抵抗は 75 M Ω であることがわかり、 $R_A = 100 \text{ M}\Omega$ を考慮すると $R_{\text{CP}} = 300 \text{ M}\Omega$ が得られる。ここで、2.4.4 で述べた CP 抵抗は CP 温度が ~74°C でほぼ同等の R_{CP} が得られ、RF 電極を冷却していることも考慮すると妥当な値だと考えられる。

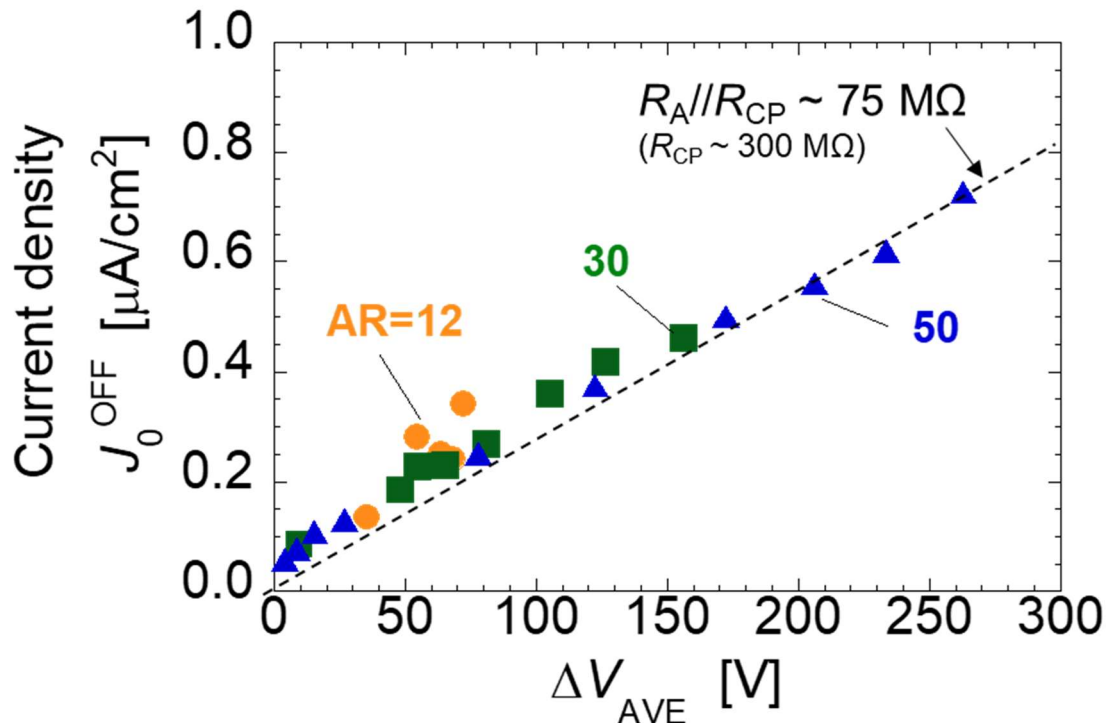


図 5-8 純 Ar 添加プラズマにおける $t = 0.5 \text{ ms}$ (パルスオフ直後) の電流密度を CP 上下間の電圧差(ΔV_{AVE})依存性

ΔV_{AVE} に対するリーク電流密度の評価を C_4F_8/O_2 添加 Ar プラズマにおいても同様に行った。その結果を図 5-9 に示す。AR の増加と共に電流密度が減少しているのがわかるが、特に純 Ar プラズマにおけるリーク電流(赤の破線)と AR = 50 における電流密度が比較的良好に一致している。これは非常に興味深い結果で、低 AR ほどフルオロカーボンの堆積が顕著となり抵抗値の減少する一方で、AR = 50 ではフルオロカーボン膜を介した電流が存在しないことを示唆する。この結果は大村らの報告[4]とも矛盾しない。このように、本研究で用いた面電荷密度時分解計測により、フルオロカーボン膜によるリーク電流評価も可能であることが示された。

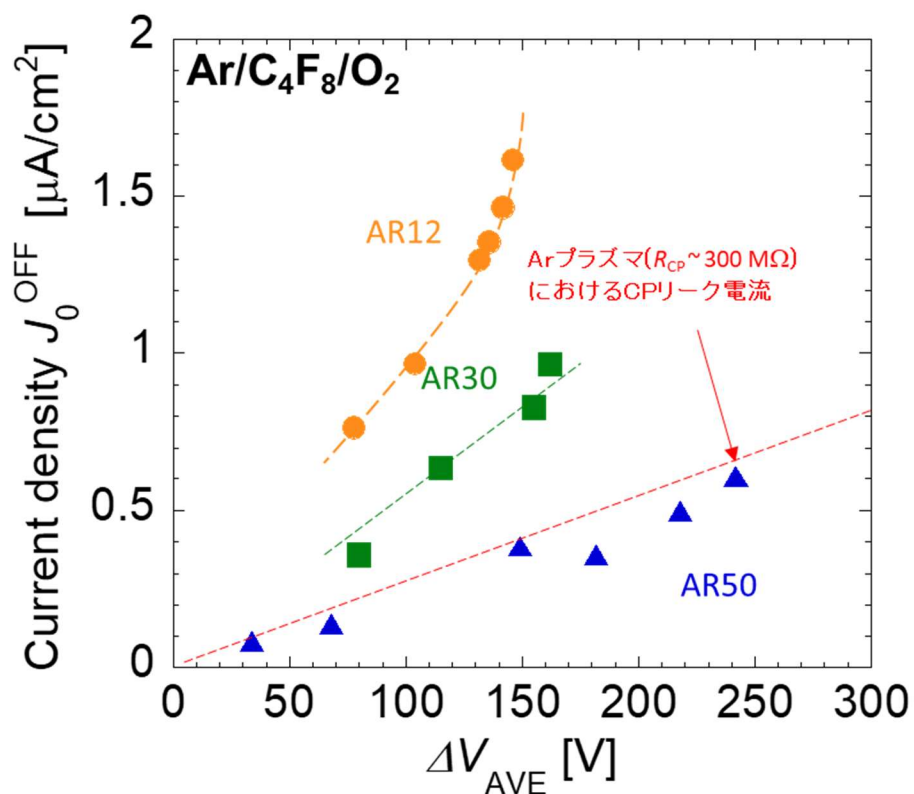


図 5-9 C_4F_8/O_2 添加 Ar プラズマにおける $t = 0.5$ ms (パルスオフ直後) の電流密度を CP 上下間の電圧差(ΔV_{AVE})依存性。参考のため純 Ar プラズマにおける CP リーク電流 ($R_{CP} \sim 300$ M Ω)を赤の破線で示した。

5.4 パルスオン及びオフ時における荷電粒子流入量評価

5.4.1 パルスオフ時における電子流入量評価

図 5-10 は図 5-7 と同様のパルスオフ時の電荷密度の時間変化である。図中の赤色の実線は、推定した CP 抵抗由来のリーク電流による面電荷の減衰を示している。実験値(緑のプロット)は、特にパルスオフ直後で、この CP 抵抗リーク電流によるものより面電荷密度 σ_B の減衰が早い。これはアフターグロープラズマからの電子流入が起因すると考えられる。

そこで、パルスオフ時の面電荷密度 σ_B の時間変化から CP 抵抗のリークによる電荷量を除去することで、負の荷電粒子である電子の CP 底部への流入総量を得ることができる。図 5-11 は、AR が 12, 30, 50 の場合のアフターグロープラズマからの電

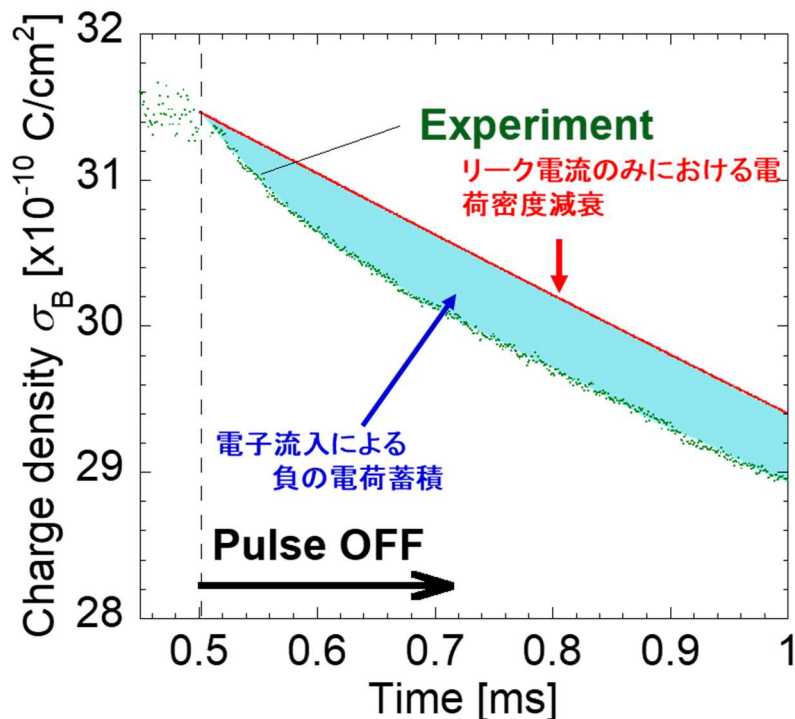


図 5-10 パルスオフ時の CP ボトム電荷の減衰。AR は 30, $V_{AVE}^{TOP_EST}$ は -254 V。小さな点は実験結果、破線は $t = 0.7 \sim 1.0$ ms の実験データを用いた指数関数回帰曲線を示している。

子電流によって CP 底部に蓄積された負の電子面電荷密度を示している。 VHF パルスをオフにしてから時間が経つにつれて、電子の電荷蓄積が始まり、 $t=0.8\sim 0.9\text{ ms}$ 、すなわちプラズマオフ後 $0.3\sim 0.4\text{ ms}$ で飽和する。この時間スケールは 2.4.3 の図 2-2 2 で述べた電子密度の緩やかな減衰時定数($132\text{ }\mu\text{s}$)と近い値を示す。また、VHF 出力が高く、AR が低い場合にも電荷蓄積の増加が観測された。この結果から、負の電荷蓄積はホールを通過する電子の透過確率に影響され、その確率は CP 上部-底部間電圧(ΔV_{AVE})と AR によって決定されることがわかった。図 4-3 では、 $V_{\text{AVE}}^{\text{TOP_EST}}$ が高くなると正電荷密度の低下が見られ、特に AR=12 の場合には正電荷密度の低下が見られる。これは、低 AR、高 VHF パワーでのパルスオフ時での負電荷蓄積によるものであることが一因である。

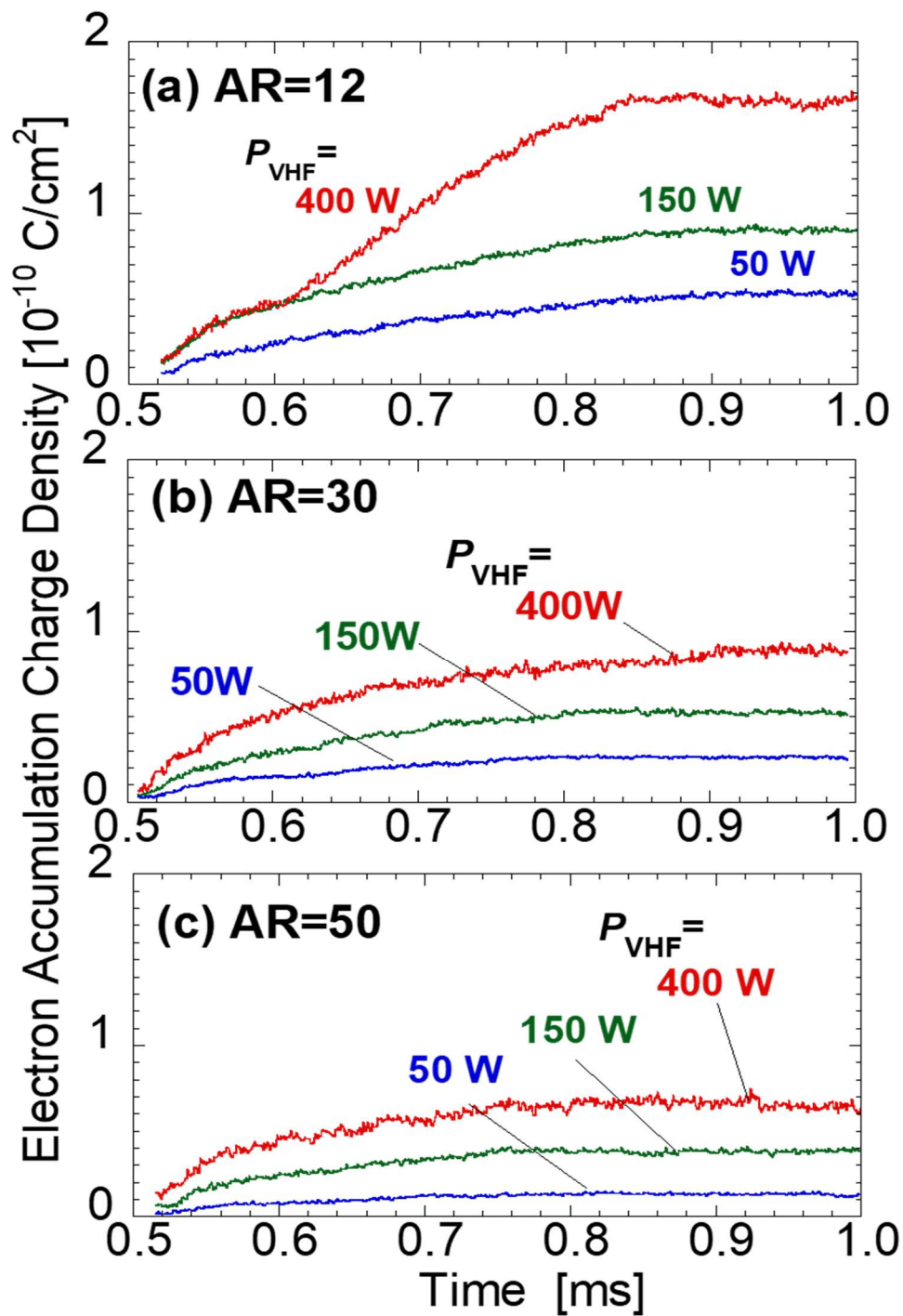


図 5-11 (a)12, (b)30, (c)50 の AR について、パルスオフ時の CP ボトムへの電子蓄積の電荷密度。

5.4.2 パルスオン時のチャージアップ電流評価

最後に、パルスオン時の正の電荷蓄積について説明する。図 5-1 2 は、AR=30、VHF 電力 200 W における純 Ar プラズマでの CP 底部のパルスオン時に注目した電荷密度(σ_B)の時間変化である。この面電荷密度の時間変化から $t=0$ から 0.1 ms にかけてチャージアップしている領域が確認できる。ここで、 $t=0$ に注目し、面電荷密度 σ_B の傾きからチャージアップ電流を評価したものを図 5-1 3 に示す。ここで横軸の ΔV_{AVE} は、 $t=0$ における ΔV_{AVE} であることに注意する (5.3 で議論した ΔV_{AVE} はパルスオフ直前の CP 上部と CP 底部の電圧差である)。また本結果は、測定された電流から CP を通るリーク電流を減じ、ホールを通過する荷電粒子によるチャージアップ電流のみを示している。チャージアップ電流は、AR=30、50 ともに $t=0$ における ΔV_{AVE}

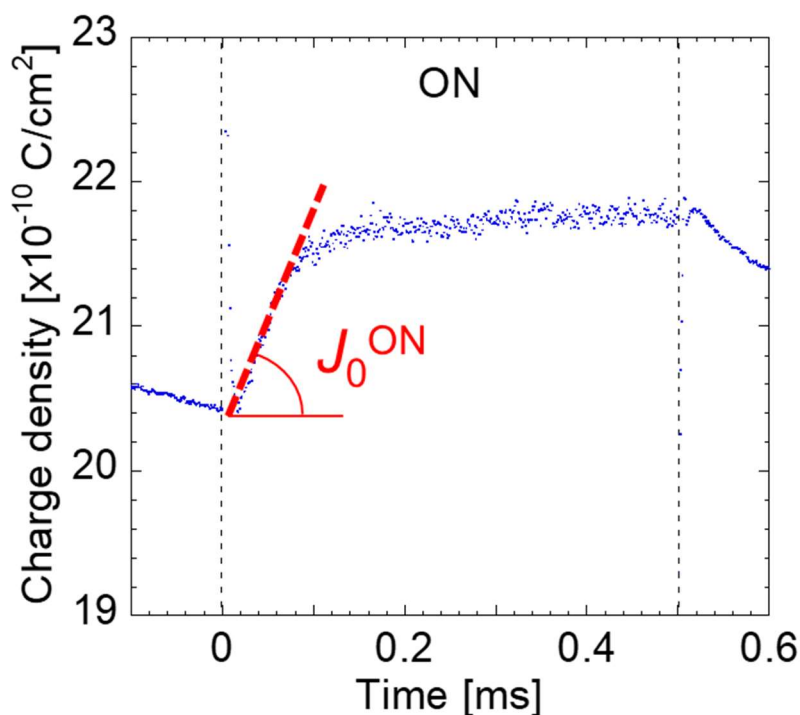


図 5-1 2 パルスオン($t=0 \sim 0.5$ ms)時における、CP 底部面電荷密度時間変化。(AR = 30 で VHF 電力 200 W)

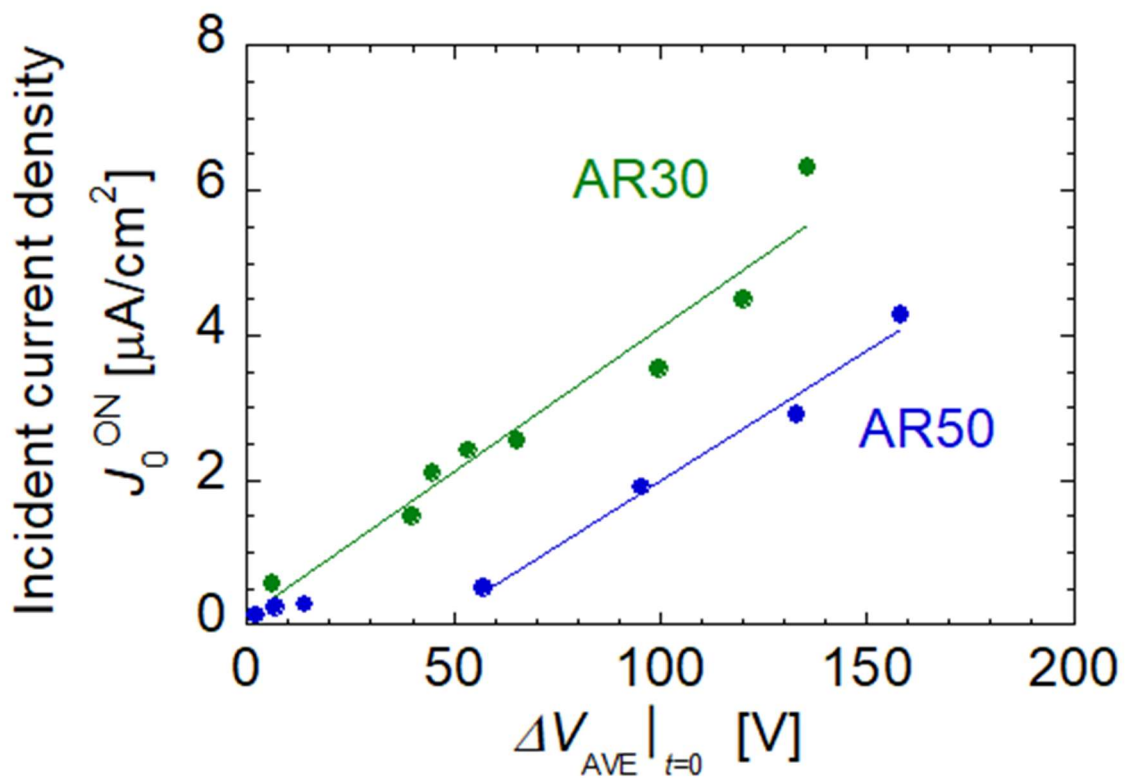


図 5-13 $t=0$ (パルスオン直後) での充電電流の CP 上下間の電圧差依存性

とともに単調に増加し、AR = 50 のチャージアップ電流は AR=30 のチャージアップ電流よりも小さくなっている。チャージアップ電流密度は数 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ のオーダーであり、図 5-8 で示した CP 抵抗リーク電流密度と比較すると、このチャージアップ電流は一桁程大きい。一方で、プラズマ密度から予想されるイオン電流密度 ($\sim\text{mA}/\text{cm}^2$) よりもはるかに小さく、これはホールを通過する電子とイオンを合わせた電流であることが考えられる。残念ながら本評価法では電子電流とイオン電流を厳密に分離することは難しい。

5.5 まとめ

第5章では、純 Ar プラズマを基に面電荷密度の時間変化からパルスオフ時の電荷緩和とパルスオン時のチャージアップ電流の評価を行った。また本評価を行うにあたり、CP 抵抗を介した電流リークを考慮するため等価回路モデルを再構築した。ここで、CP の抵抗を未知数としてパルスオフ時の面電荷密度減衰の時定数から推定すると 300 M Ω の値が得られた。また C₄F₈/O₂ 添加プラズマにおいて、低 AR ほど CP 抵抗が低下したことからフルオロカーボン膜堆積によるリーク抵抗減少が示唆された。特筆すべきは、AR=50 において、CP リーク抵抗がおよそ 300 M Ω であることから、高 AR ではそもそもフルオロカーボンは底部まで堆積しないことが示された。評価されたリーク抵抗から推定されるリーク電流の影響を除外して、ホールを通過して CP 底部に流入する荷電粒子について評価をおこなった。パルスオフ直後 0.3 ~ 0.4 ms 程度においてはアフターグロープラズマからの電子電流が存在することが確認された。パルスオン時のチャージアップ電流が数 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ でありプラズマから直接飛来する電流よりずっと少ないことが示された。

参考文献

- [1] 柴田 尚志: 基礎からの過渡現象 (森北出版株式会社, 2019).
- [2] 小郷 寛, 小亀 英己, 石亀 篤司: 基礎からの交流理論 (電気学会, 2012).
- [3] 白藤 立: 電気回路基礎 (プレアデス社, 2018).
- [4] M. Ohmura, J. Hashimoto, T. Adachi, Y. Kondo, M. Ishikawa, J. Abe, I. Sakai, H. Hayashi, M. Sekine, and M. Hori: *Jpn. J. Appl. Phys.* **58** (2019) SEEB02.

第6章 総括

6.1 本論文の結論

近年の半導体デバイス、特にメモリの需要がますます拡大しており、ホールパターンエッチングの高アスペクト比(HAR)化が要求される。実際のエッチングプロセスにおいて構築されるホールパターン内部でのチャージアップに起因されるエッチング速度の低下や形状異常について多くの報告例がある。そのチャージ量の評価は鉛ガラス製のキャピラリープレート(CP)で模擬されたホールパターン底部における電圧を指標に行われてきた。しかし、電圧測定ではホールに蓄積する電荷密度の絶対値を知ることができない。そのため、本研究では実際に蓄積する面電荷密度がどの程度か、またその蓄積と緩和の過程がどのようになっているかを本研究のために立ち上げた40 MHz VHF のパルス駆動容量結合型プラズマ源中において等価回路と静電モデルを基に面電荷密度の絶対値を評価した。

第1章では先述のとおり、研究の背景として半導体メモリの需要が高まっていること、ホールエッチングプロセスにおけるチャージアップによる問題について述べた。また、一般的な半導体プロセスの概要と用いられるプラズマ源、および異方性エッチングメカニズムについても触れた。

第2章では、本研究のために立ち上げたエッチングプロセスで使用される装置を模した二周波重畳容量結合プラズマ源とその基本特性について述べた。まず設計指針を得るため簡易的な有限要素シミュレーションを行った。シミュレーションの結果、高周波電極の側面にRFシールドを設置し、電極間の空間を抑制することがプラズマの閉じ込めに有効であることが解った。この設計指針に基づいて製作された実際の装置

で生成されるプラズマの基本パラメータを各種プローブ法で評価し、Ar プラズマでは $\sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ の高密度プラズマが得られることを示した。

第3章では、論文で最も重要となるキャピラリープレート(CP)底面の面電荷密度の絶対評価方法及び評価例について述べた。面電荷密度は静電気学に基づいて静電容量と平均電圧から求めることができる。本章では、まず、CPの静電容量を評価するために、高電圧プローブを用いてCPの上部と下部の高周波電圧振幅を測定した。次に、CPの上部と下部の平均電圧とCPの静電容量に基づいて表面電荷密度を評価した。しかし、CPの上部に電極がある構造(前章で述べたType-1のセットアップに相当)では、CPの下部にイオンが流れ込むことができず、CPの下部に蓄積された電荷を評価することができない。そのため、CP上部に電極を配置しない場合のCP上部の電位を推定する必要がある。本研究では、CP上部の平均電圧がCP上部のRF電圧発振によって発生する自己バイアス電圧であることに着目し、プラズマからRF電極までの構造をコンデンサからなる等価回路で表現した。これをもとに、RF電極のRF電圧振幅からCP上部の自己バイアス電圧を推定した。この方法で得られたCP上部と下部の平均電圧から、静電モデルを用いて各境界の表面電荷密度を求めることに成功した。その結果、CP下部の正面電荷密度の絶対値は、 $\sim 25 \times 10^{-6} \text{ C/cm}^2$ であることがわかった。

第4章では、パルスオンとパルスオフの定常状態の電圧に着目し、印加電力に対するホールのアスペクト比と表面電荷密度を評価することで、パルスプラズマにおける電荷蓄積の挙動を考察した。まず、VHF単周波での表面電荷密度を評価し、VHF電力(CP上部の自己バイアス電圧)に対して、CP下部で電荷蓄積がほとんど起こらない領域、正の表面電荷蓄積が起こる領域、正の表面電荷密度が減少する領域の3つの領域が存在することを示した。特に表面電荷密度が低下する領域では、CW放電とパルス放電を比較すると、パルスをオンにしても負の電荷を帯びた粒子がCPの底部に

流れ込む可能性があることが示唆される。さらに、LF パワーを重畳して CP の上部に強い負バイアスを誘導することで、高アスペクト比ホール下部に負電荷の蓄積が起こることを示した。これは従来の考えを覆す興味深い発見である。

第5章では、純 Ar プラズマ中の面電荷密度の時間変化から、パルスオフ時の電荷緩和とパルスオン時のチャージアップ電流を評価した。パルスオフ時の面電荷密度減衰の時定数から CP 抵抗は 300 M Ω と推定された。C₄F₈/O₂ 添加プラズマでは、AR の減少に伴って CP 抵抗が減少し、フルオロカーボン膜の成膜によりリークしやすくなることが示唆された。また、AR = 50 では CP のリーク抵抗は 300 M Ω 程度であり、高 AR ではそもそもフルオロカーボンが底部付近のホール側面に析出していないことを示唆している。評価したリーク抵抗から推定したリーク電流の影響を除いて、穴を通して CP の底部に流れる荷電粒子を評価した。その結果、パルスオフ直後の約 0.2 ms の間、アフターグロープラズマからの電子電流が存在することを確認した。パルスオン時のチャージアップ電流は数 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ であり、プラズマから直接流れる電流よりもはるかに小さいことがわかった。

本研究における最大の成果は、エッチングホールのパターンを鉛ガラス製の CP で模擬した測定系における電圧測定と等価回路モデルからホールを通過し直接流入する電流と CP 抵抗を通じてリークする電流の評価を行ったことである。このとき構築した等価回路モデルはホールパターンの静電容量と抵抗から構築されるため、実際の被エッチ対象物質の物性(導電率及び比誘電率)と構造が解ればリーク抵抗及び流入電流を推定できることを示した。

6.2 今後の展望

本研究ではホールエッチングプロセスにおけるチャージアップを評価する手法を確立した。本チャージ量評価手法は CW プラズマやパルスプラズマだけでなく、HIGH/LOW 電力印加プラズマなど様々な印加電力のプラズマにおいて有効である。また、本測定では金属電極を用いたがこれは低抵抗 Si 基板においても同様の評価が可能であるため、CP ではなく実際のプロセスにおけるホールパターンにも適応することができる。そのため新規プロセスレシピを提案するときに本手法を適応して蓄積電荷が最も小さくなる、さらには負に帯電するような最適な電力印加法を模索することが可能となる。

プロセスレシピを考案する上では、印加電力だけでなくイオン入射エネルギーやイオン入射角度分布の制御も重要である。本手法におけるチャージ量評価ではイオンエネルギー分布は CP 上部の自己バイアス電圧(平均のイオンエネルギー)と仮定して行った。特に低周波バイアス印加時におけるイオンの入射エネルギー分布と入射角度分布と蓄積電荷量の関係を体系化するとチャージアップ機構をより明確にできると考えられる。

付録

A. シミュレーションの支配方程式及び基礎パラメータ

本研究を始めるにあたり，汎用物理シミュレーションソフトウェア COMSOL を用いてプラズマシミュレーションをおこなった(2.2 参照)。COMSOL は有限要素法をもとにしたシミュレーションソフトであり，電磁界や粒子輸送の支配方程式のセットがモジュールとして自由に組み合わせられるようになっている。本解析ではプラズマモジュールの一つである容量結合プラズマ(Capacitive coupled plasma : CCP)インターフェースを用いた。本付録では計算に用いられる支配方程式について説明する[1]。

CCP モジュールでは電位，電子密度および電子エネルギー密度などの従属変数を基に電子輸送，容量性パワー，電子衝突反応，粒子種間反応などを計算する。電子の輸送である粒子束 Γ_e は空間電荷分布 ρ 及び接地などの境界条件からポアソンの方程式により求められた電位空間分布の勾配から移動度で計算される移動性流束(第一項)と電子密度勾配(第二項)による拡散性流束の二種類がある。

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (\text{A.1})$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (\text{A.2})$$

$$\Gamma_e = -(\mu_e \cdot \mathbf{E})n_e - \mathbf{D}_e \cdot \nabla n_e \quad (\text{A.3})$$

空間の各点における電子密度の変化は次式で表される。

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e - (\mathbf{u} \cdot \nabla)n_e \quad (\text{A.4})$$

ここから電流が計算され，また空間の電位から容量性の RF パワーが計算される。

電子の運動エネルギーはマクスウェル分布をとると仮定している。マクスウェル分布は次式で表される。

$$f(v) = n \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} 4\pi v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2k_B T}\right) \quad (\text{A.5})$$

ここで、 n は粒子数密度、 m は粒子質量、 T は粒子温度、 v は粒子の平均速度、 k_B はボルツマン定数である。電子-中性粒子衝突反応では衝突断面積データセット σ と電子エネルギー、即ち電子温度より反応速度定数 K を算出し、弾性衝突、励起反応、電離反応の反応速度 R を計算している。

$$K(T) = \int_0^{\infty} v\sigma(v)f(v)dv \quad (\text{A.6})$$

$$R(T) = K(T)n_e n_n \quad (\text{A.7})$$

弾性衝突は電子と対象粒子の質量比で電子のエネルギー損失 S_{Elastic} を損失係数 κ も含めて算出する。

$$\kappa = \frac{2m_e m_n}{(m_e + m_n)^2} \quad (\text{A.8})$$

$$S_{\text{Elastic}} = \kappa \left(\overline{E_e} - \frac{3}{2} k_B T_n / e \right) \quad (\text{A.9})$$

一方励起反応、電離反応では中性粒子の励起に必要なエネルギー、また電離に必要なイオン化エネルギーの分だけ電子エネルギー損失が生じる。弾性衝突と反応エネルギー損失を合わせた総電子エネルギー損失 S_{en} は

$$S_{en} = \int_V R(T)\Delta E + S_{\text{Elastic}} dV \quad (\text{A.10})$$

となる。同時に、準安定準位の粒子とイオンが生成されるなどといった粒子種数密度の変動も計算される。中性粒子間衝突反応では、粒子の数のみ変動する計算をおこない、反応速度定数をこちらで定義したものとしている。静電界、電子衝突反応、誘導電界による電子のエネルギー収支はすべてエネルギー密度 n_e の変化に適応され、

拡散やドリフトによる加速などの項を含め次式で表される。

$$\frac{\partial n_{\epsilon}}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_{\epsilon} + \mathbf{E} \cdot \Gamma_{\epsilon} = S_{\text{en}} - (\mathbf{u} \cdot \nabla) n_{\epsilon} + Q_{\text{ind}} \quad (\text{A.11})$$

ブロッキングコンデンサを模擬した RF 電極上の誘電体境界では，電荷蓄積条件として

$$J_e - J_i = \frac{d\rho}{dt} \quad (\text{A.12})$$

を適応した。ここで， J_e は電子電流密度で， J_i はイオン電流密度である。

本解析で想定した化学種(粒子種)は，電子，Ar 原子，準安定状態の Ar,及び Ar イオンである。各設定及びパラメータは表 A-1 に示す。プラズマ生成過程は基本的な電子衝突過程(弾性衝突，励起衝突，脱励起衝突，電離衝突)を考慮した。また，準安定状態の Ar 原子同士の衝突も考慮した。それらの反応過程をまとめたものを表 A-2 に示す。また，壁面では準安定 Ar 原子，イオンが基底準位になる反応を考慮している(表 A-3)。

表A-1 化学種一覧

Species	e	Ar	Ar*	Ar+
Type	Electrom	Neutral	Neutral	Ion
molar mass [kg/mol]	*	0.04	0.04	0.04
Potential characteristics length [Å]	*	3.33	3.33	3.33
Minimum of potential [K]	*	136.5	136.5	136.5
Dipole moment [C·m]	*	0	0	0
Number of charge	-1	0	0	1
Diffusion coefficient [m ² /s]	*	0.01	0.01	0.01

表A-2 プラズマ気相反応過程

Reaction	Energy loss [eV]	Reaction speed constant k _f	
e+Ar→e+Ar	*	By cross-section data	
e+Ar→e+Ar*	11.5		
e+Ar*→e+Ar	-11.5		
e+Ar→e+Ar ⁺	15.8		
e+Ar*→e+Ar ⁺	4.43		
Ar*+Ar*→e+Ar+Ar ⁺	0		6.2x10 ⁻¹⁶ m ³ /s
Ar*+Ar→Ar+Ar	0		3.0x10 ⁻²¹ m ³ /s

表A-3 表面反応過程

Reaction	reaction rate	secondary electron emission coefficient
Ar ⁺ →Ar	1	0
Ar*→Ar	1	0

参考文献

- [1] 森山 誠：容量結合を考慮した誘導結合型プラズマ源のシミュレーション，中部大学大学院工学研究科修士論文(2018) (未公刊).

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文作成にあたり，終始懇切なご指導ご鞭撻ならびに，ご助言を受け賜りました，名古屋大学大学院工学研究科 豊田 浩孝 教授に心より感謝申し上げます。

本論文をまとめるにあたり，多くの有益なご教示を頂きました，名古屋大学低温プラズマ科学研究センターセンター長 堀 勝 教授，名古屋大学低温プラズマ科学研究センター 関根 誠 特任教授，ならびに京都大学大学院工学研究科 江利口 浩二 教授に厚く御礼申し上げます。

本研究に取り組むにあたり，実験機器の提供ならびに有益なご教示を頂きました，共同研究者のキオクシア株式会社 栗原 一彰 博士，飯野 大輝 博士，福水 裕之 博士に心から感謝申し上げます。

また，研究生活及びに論文の作成において多くの助力，助言を賜りました，名古屋大学大学院工学研究科 鈴木 陽香 助教に心の底からお礼申し上げます。

研究に遂行にあたり，同テーマで苦楽を共にした M2 中原 尚哉 氏， Chu Manh Hung 氏， B4 の市川 景太 氏に心からお礼申し上げます。

また，研究生活において異なる広い知見を持った豊田研究室博士後期課程 Bae Hansin 氏，田村 晃汰氏，博士前期課程 鈴木 丈 氏，小笠原 知宏 氏，千葉 行徳 氏，疋田 和也 氏，山口 和也 氏，秘書 村沢 美保 氏には多くのご助力を賜りましたので，感謝申し上げます。

最後に，より広い知見を得るためにと豊田教授をご紹介して下さった，中部大学工学部電気電子システム工学科 中村 圭二 教授，プラズマ科学の世界にのめり込むきっかけを与えて下さった中部大学工学部電気電子システム工学科 小川 大輔 講師，かつて懇切丁寧にご指導賜った Ivan P. Ghanashev 博士に厚く御礼申し上げます。

2021 年 3 月

研究実績

論文題目	公表の方法及び時期	著者
I. 学会誌等		
1. Evaluation of absolute charge density at the bottom of high aspect capillary holes exposed to a pulsed very high frequency plasma	Japanese Journal of Applied Physics, 59 , SJJB03, 2020	Makoto Moriyama, Naoya Nakahara, Akihiro Mitsuya, Haruka Suzuki, Kazuaki Kurihara, Daiki Iino, Hiroyuki Fukumizu, Hirotaka Toyoda
2. Time-dependent Measurement of charge density on the bottom of high aspect capillary hole in pulse-modulated VHF capacitively coupled Ar plasma	Japanese Journal of Applied Physics, 60 , 016001, 2021	Makoto Moriyama, Naoya Nakahara, Kazuaki Kurihara, Daiki Iino, Hiroyuki Fukumizu, Haruka Suzuki, Hirotaka Toyoda
II. 国際会議		
1. Suppression of sputtering of dielectric window using Faraday shield in inductively coupled plasma	ISPlasma 2017/IC-PLANTS2017 Aichi, Japan (March 1-5, 2017)	Makoto Moriyama, Daisuke Ogawa, Ivan Ganachev, Keiji Nakamura
2. FEM Simulation of Antenna Self-Inductance Effects in ICP	The 70th Annual Gaseous Electronics Conference, Pittsburgh, USA (November 6-10, 2017)	Makoto Moriyama, Ivan Ganachev, Keiji Nakamura
3. Influence of capacitive coupling on the sheath of inductively coupled plasma for material processing	39th International Symposium on Dry Process, Tokyo, Japan (November 16-17, 2017)	Makoto Moriyama, Ivan Ganachev, Keiji Nakamura

<p>4 . Axisymmetric two-dimensional modeling of inductively-coupled plasma sources with Faraday shield for self-consistent simulation</p>	<p>ISPlasma 2018/IC-PLANTS2018, Aichi, Japan (March 4-8, 2017)</p>	<p>Makoto Moriyama, Ivan Ganachev, Keiji Nakamura</p>
<p>5 . Measurement of ion energy in dual-frequency capacitive coupled plasma</p>	<p>XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases and 10th Conference on Reactive Plasmas, Sapporo, Japan (July 14-19, 2019)</p>	<p>Makoto Moriyama, Akihiro Mitsuya, Naoya Nakahara, Haruka Suzuki, Hirotaka Toyoda</p>
<p>6 . Potential structure of high-aspect-ratio capillary hole in a pulsed-VHF capacitive coupled plasma</p>	<p>41st International Symposium on Dry Process Hiroshima, Japan (November 21-22, 2019)</p>	<p>Makoto Moriyama, Akihiro Mitsuya, Naoya Nakahara, Haruka Suzuki, Hirotaka Toyoda</p>
<p>7 . Evaluation of absolute charge density at the bottom of hole pattern using high aspect ratio capillary plate</p>	<p>The 73rd Annual Gaseous Electronics Conference Virtual (October 5-9, 2020)</p>	<p>Makoto Moriyama, Naoya Nakahara, Haruka Suzuki, Hirotaka Toyoda</p>