



Title	大気圧プラズマを用いた多電極全面一括型ナノ精度数値制御加工法の開発
Author(s)	武居, 弘泰
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/61767
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

大気圧プラズマを用いた多電極全面一括型
ナノ精度数値制御加工法の開発

2017年1月

大阪大学大学院工学研究科 精密科学・応用物理学専攻

武居 弘泰

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的	2
1.3 本論文の構成	2
第2章 精密数値制御表面加工法	3
2.1 緒言	3
2.2 ラスタースキャン型決定論的加工法	3
2.3 ラスタースキャン型決定論的加工技術の例	6
2.3.1 Ion Beam Figuring	6
2.3.2 Elastic Emission Machining	7
2.3.3 Plasma Jet Machining	8
2.3.4 Local Wet Etching	10
2.3.5 Plasma Chemical Vaporization Machining	11
2.3.6 大気圧プラズマ犠牲酸化法	13
2.4 全面一括型決定論的加工法	15
2.5 結言	18
第3章 電極試料間ギャップ制御型多電極大気圧プラズマ発生装置の開発	21
3.1 緒言	21
3.2 多電極大気圧プラズマ発生装置の概要	21
3.2.1 プラズマの制御手法	22
3.2.2 シミュレーションによる電極サイズの検討	23
3.2.3 装置構成	23
3.3 多電極大気圧プラズマ発生装置の加工特性	25
3.3.1 プラズマの個別制御制	25
3.3.2 均一酸化実験	27
3.3.3 酸化膜厚の酸化時間依存性	28
3.3.4 電極電位の上昇による酸化速度の増加	29

3.3.5	投入電力制御による酸化速度増加の抑制	31
3.3.6	試料水冷機構の検討	33
3.3.7	酸化膜厚に対する Si の加工量割合	37
3.4	φ8 インチ SOI ウエハの Si 薄膜層膜厚均一化加工	39
3.5	膜厚均一化加工後の Si 薄膜層膜厚分布詳細測定	46
3.6	結言	47
第 4 章	電圧制御型多電極大気圧プラズマ発生装置の基礎検討	49
4.1	緒言	49
4.2	電極間距離に関する検討	49
4.2.1	電極間距離検討のための基礎実験装置概要	50
4.2.2	電極電圧に対する必要電極間距離	51
4.2.3	電極境界部の酸化膜厚分布	54
4.3	7 電極を有する多電極装置を用いた実験	56
4.3.1	7 電極装置概要	56
4.3.2	実験条件の最適化	57
4.3.3	酸化膜の再現性	60
4.3.4	7 電極装置における酸化膜厚の時間依存性	61
4.4	スイッチング機構の検討	62
4.4.1	交流対応のスイッチング回路	62
4.4.2	電源周波数、電極電圧、素子数の影響	63
4.4.3	MOSFET を用いたプラズマの独立制御	67
4.4.4	プラズマ制御の応答速度評価	69
4.4.5	使用する素子の最適化	71
4.5	7 電極装置における数値制御実験	73
4.5.1	プラズマ発生面積に応じた投入電力制御	73
4.5.2	電極電位に応じた投入電力制御	75
4.5.3	7 電極装置における数値制御実験	77
4.5.4	加工後表面の評価	81
4.6	結言	82
第 5 章	薄膜多電極大気圧プラズマ発生装置による数値制御加工	85
5.1	緒言	85
5.2	薄膜電極の検討	85
5.3	薄膜電極における酸化膜厚の時間依存性	91

5.4 酸化膜厚に対する Si の加工量割合	93
5.5 19 電極領域における数値制御犠牲酸化加工	94
5.6 加工後表面の評価	98
5.7 結言	101
第 6 章 総括	103
参考文献	109
研究業績	113

謝辞

第 1 章 序論

1.1 本研究の背景

科学技術の進歩に伴い、最先端計測機器や最先端電子デバイス分野においては、その高精度化、高分解能化、高集積化、高速化等を目的に、極めて高い形状精度を有する光学素子や基板が必要とされてきた。近年では、硬 X 線集光装置用非球面ミラーや X 線望遠鏡用非球面ミラー、半導体露光装置用非球面レンズ、極端紫外線(EUV)露光装置用ミラー等の光学素子には、ナノメートルレベルの形状精度が必要とされている。例えば、硬 X 線集光用ミラーでは $500 \times 50 \text{ mm}^2$ の領域において 2 nm 以下の形状誤差が必要とされている。その他、装置に組み込まれるミラーだけでなく、例えば EUV 露光装置を用いて集積回路を作成するためには極めて高精度なマスク基板が消耗材として何枚も必要となる。また半導体分野においても、高性能演算回路や画像センサー、高周波デバイス等に用いられる Silicon on Insulator (SOI) と称する半導体基板では、厚み精度としてサブナノメートルが必要とされており、データ通信に不可欠な振動子用の基板にも極めて高い精度が必要とされている。その精度は、 $\phi 300 \text{ mm}$ のウエハにおいて Si 薄膜層の膜厚均一性が P-V 値で 1.0 nm 以下である。こうしたナノメートルレベルの形状精度を実現するための加工法として、あらかじめ高精度に計測した形状誤差分布に基づき、その誤差分のみを精密に加工する「決定論的加工法」が数多く開発されている。これは事前に計測した誤差に基づき、任意の位置に対して任意の量の加工を行う手法である。それらは一般に、局所的に精密加工が可能な加工ヘッドと送り速度制御が可能な精密 XY テーブルから成り、形状誤差の大きい場所ではテーブルの送り速度を遅くすることで加工ヘッドの滞在時間を長くして加工量を増やし、形状誤差の小さい場所では高速な送りにより滞在時間を短くして加工量を減らしながら、被加工物全面を走査加工することによって、形状誤差を修正するものである。加工ヘッドとして局所的な研磨工具を用いた Computer Controlled Polishing (CCP) 法、局所的なイオンスパッタリングを用いた Ion Beam Figuring (IBF) 法、局所的な微粒子供給機構を用いた数値制御 EEM (Elastic Emission Machining) 法、局在させた大気圧プラズマ中でのプラズマエッチングを用いた数値制御プラズマ CVM (Chemical Vaporization Machining) 法等、様々な加工法が提案されており、これらによって極めて精度の高い非球面光学素子を製作可能であることが報告されている。しかしながら、このような加工法においては単一の加工ヘッドに対して被加工物全面を走査加工するために、特に被加工物表面が大面積である場合や、加工の横方向空間分解能を向上させるために小径の加工ヘッドを用いる場合等において、全面走査に長時間を要することとなる。決定論的加工を産業に応用するとき、少量生産であれば長時間の加工は問題にならないが、大口径半導体基板のような大量生産が求められるものの加工に決定論的加工を適用することは困難であった。そこで、必要加工時間が加工面積に依存しない高精度かつ高能率な決定論的加工法が求められている。

1.2 本研究の目的

そこで本研究では、高能率な「決定論的加工法」の実現を目指し、単一の加工ヘッドを被加工物表面に対して全面走査する従来の方法ではなく、多数の加工ヘッドを被加工物全面に隙間なく敷き詰めて配置し、個々の加工ヘッドの処理時間を個別に制御する全く新しい全面一括型「決定論的加工法」を提案する。本論文では、加工ヘッドとして大気圧プラズマを用いることとし、多数のプラズマ発生用電極を被加工物全面に対向させて配置し、個々の電極のプラズマ発生時間を個別に制御することで、全面一括の数値制御加工を実現することを目指した。個々の電極のプラズマを独立に ON/OFF 制御するために、個別に電極試料間距離を制御する方式と個別に印加電圧を制御する方式の 2 方式を提案し、それぞれ装置を試作して基礎検討を行った後、数値制御加工の対象として SOI 基板の薄膜シリコン層の厚さ均一化を、加工法としては大気圧プラズマ犠牲酸化法を適用して検討を行い、多電極全面一括型の数値制御加工が実現可能であることを示すことを目的とする。

1.3 本論文の構成

本論文は全文 6 章よりなる。

第 2 章では、決定論的加工法に用いられるラスタースキャンの概念を説明し、これまでに開発された、ラスタースキャンの概念に則った精密数値制御加工技術について紹介する。そして、本研究で提案する全面一括型数値制御加工の概念について説明し、ラスタースキャンと比較したときのメリットとデメリットを述べる。

第 3 章では、電極試料間ギャップ制御型の多電極大気圧プラズマ発生装置の概要を詳説する。また試作装置の加工特性をデータと共に詳細に説明し、SOI ウエハの Si 層膜厚均一化加工を行った結果を述べ、ギャップ制御型の手法の特長について整理する。

第 4 章では、電圧制御型のプラズマ制御手法を提案し、多電極大気圧プラズマ発生装置設計のために必要な 2 つの重要な検討事項であるプラズマスイッチング機構の検討と電極間隔に関する検討について詳細に述べ、電極固定型のコンセプトの元に試作した 7 つの電極をもつ基礎実験装置の加工特性と数値制御加工実験の結果を述べる。

第 5 章では、プリント基板製造技術を用いて作製した 19 個の薄膜電極を有する装置による SOI ウエハの数値制御加工実験において 1 時間以内に 1nm 以下の加工精度で加工を実現した結果について述べる。

最後に第 6 章として、本研究で得られた成果を総括する。

第2章 決定論的加工法

2.1 緒言

研磨圧力や切込み深さの変位などを制御することで加工を行う機械的加工では、装置の熱変形や外乱、微振動の影響により、ナノオーダーの精度で任意の表面形状を作製することは極めて困難である。これまでに試料に対して非接触な加工ヘッドを用い試料各位置の加工量を加工ヘッドの滞在時間で精密に制御可能な、多くの決定論的加工法が開発されてきた。それらの手法は加工に用いる物理現象が異なるため、精度、速度、空間分解能、加工後表面の表面粗さやダメージなどの点で異なる特徴を有しており、それぞれの長所を活かした用途に用いられる。

本章では、まず決定論的加工を行う際に一般的に用いられるラスタースキャン方式の概念について述べ、これまでに開発されてきた種々の決定論的加工法の原理や特徴について述べる。その後、本研究で提案する全面一括型加工の概念を比較して説明し、全面一括型のコンセプトの可能性について述べる。

2.2 ラスタースキャン型決定論的加工法^{1,2)}

決定論的加工法とは、事前に計測した誤差に基づき、試料各位置に対してその誤差を補償する加工量を設定し加工を行うものである。決定論的加工を行う手法として、ラスタースキャンと呼ばれる手法が一般的に用いられる。これは図 2.2.1 に示すように、局所的な精密加工が可能な加工ヘッドと、送り速度制御が可能な XY ステージを用い、加工ヘッドに対して試料をまず X 方向(Y 方向)に速度制御をかけながら送り、試料の端に達すると微小な送りピッチ分だけ Y 方向(X 方向)に送り、再び X 方向(Y 方向)に送り、これを繰り返すことで試料全面の加工を行うものである。

図 2.2.2 に決定論的加工法の原理図を示す。加工ヘッドによって生成される単位時間あたりの加工痕形状を $f(x, y)$ 、加工ヘッドの滞在時間分布を $g(x, y)$ としたとき、この二つを式(2.2.1)のようにコンボリューションすることで除去形状を算出することができる。逆にラスタースキャン加工を行う場合は、予め単位加工痕形状を明らかにし、目標除去形状を決定し、式(2.2.1)をデコンボリューションすることで、加工ヘッドの滞在時間分布を算出する。なお、 A は加工領域である。

$$h(x, y) = \iint_A g(u, v) f(u - x, v - y) du dv \quad (2.2.1)$$

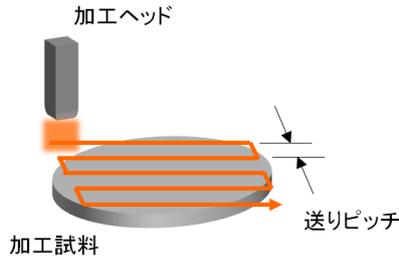


図 2.2.1 ラスタースキャン型決定論的加工法の概念図

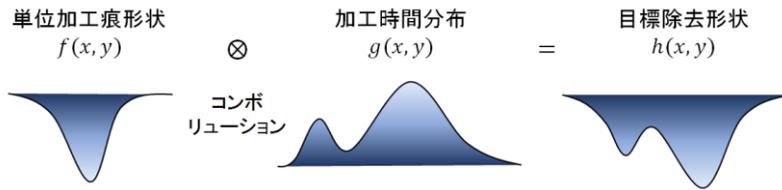


図 2.2.2 決定論的加工法におけるコンボリューションモデル

図 2.2.3 にラスタースキャン型の決定論的加工法のプロセスを示す。まず前加工面の表面形状を精密に計測し、そこから目標形状分布を引き算することで必要加工量分布を得る。次に、加工量は加工ヘッドの滞在時間に比例するという原理に基づき、事前に得られている単位加工痕形状で加工量分布をデコンボリューションすることで、送り速度分布と送りピッチを算出することができる。算出結果に基づいて数値制御加工を行うことで、所望の表面形状を得ることができる。

図 2.2.4 に計算アルゴリズムを示す。まず、前加工面形状 $Z_1(x,y)$ と目的形状 $Z_2(x,y)$ との差から設定加工量分布 $Z_3(x,y)$ を計算する。走査方向において、間隔 ds ごとに設定した速度データ設定格子点の番号を $1, 2, \dots, N-1, N, N+1, \dots$ とし、 N 番目の地点において、その点を中心に ds の幅で設定加工量を積分し、それを $S(N)$ とする。次に、単位時間(T_1)あたりにおける単位加工痕の体積を S とし、

$$T(N) = \frac{S(N)}{S} \times T_1 \quad (2.2.3)$$

を速度データ設定格子点すべてにおいて計算し、仮の滞在時間分布を求める。その検算として、加工痕形状 $U(x,y)$ と仮のプラズマ滞在時間 $T(N)$ とのコンボリューションにより、加工量分布 $A(x,y)$ を導出する。前加工面形状からその加工量分布を差し引いた形状と目的形状の差をそれぞれの格子点ごとに求め、 $S'(N)$ とする。次に、

$$DT(N) = \frac{S'(N)}{S} \times T_1 \quad (2.2.4)$$

を計算し、

$$T(N) = T(N) + \alpha DT(N)$$

と補正した後、同様に加工量を導出して再び目的形状との差を求める。このループを繰り返すことによって、最終的に形状誤差の値が最小となるような送り速度分布を導出することができる。

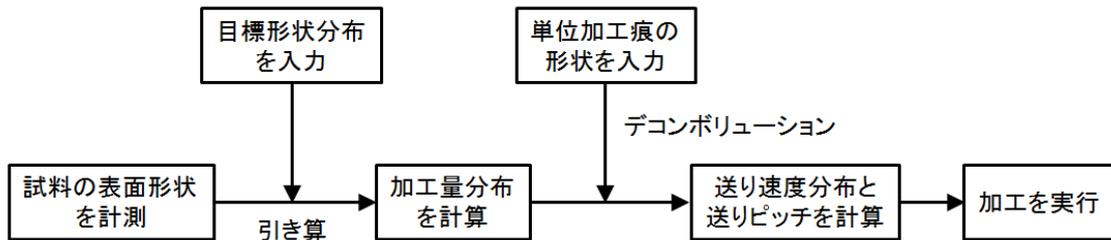


図 2.2.3 ラスタースキャン型決定論的加工法における数値制御加工プロセス

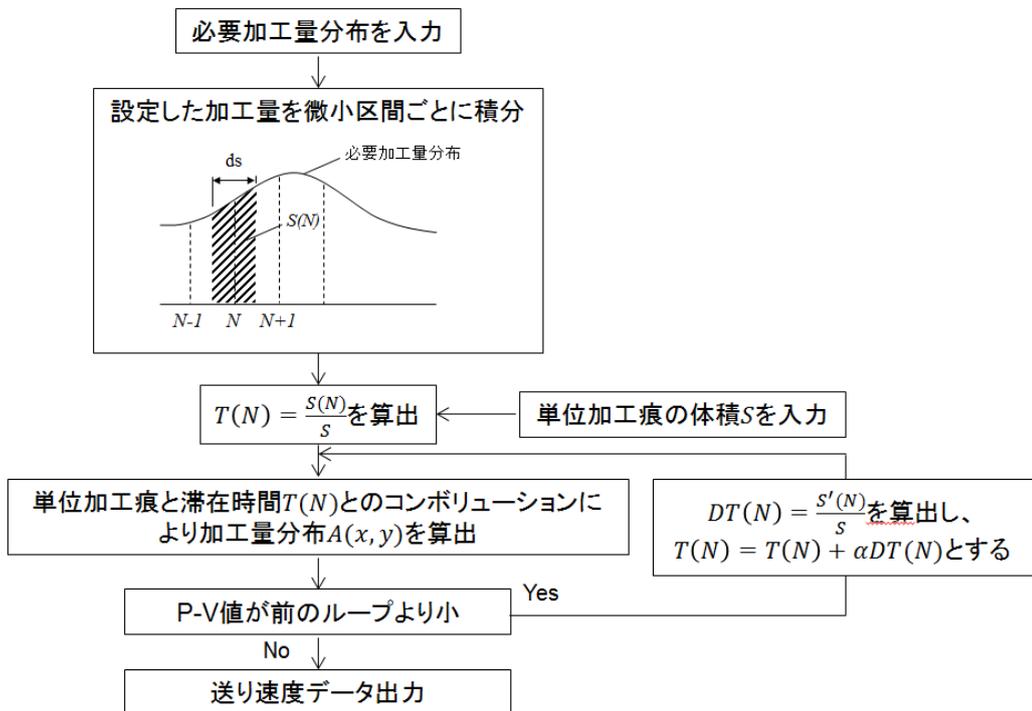


図 2.2.4 送り速度分布の計算アルゴリズム

2.3 ラスタースキャン型決定論的加工技術の例

2.3.1 Ion Beam Figuring^{3~12)}

Ion Beam Figuring (IBF)とは、プラズマ中からイオンを引き出し、イオンを加速及び集束して被加工物に照射し、その衝突エネルギーを利用して加工を行う方法である。イオンを照射することで加工を行っているため、原理的には原子スケールで加工することが可能である。また、真空中での加工であるため、加工後は清浄表面を作製することができる。特徴としては、数ナノメートル程度の加工精度を持ち、中周期領域の表面粗さもあまり悪化させない。そのため、主に非常にシビアな形状誤差と表面平滑性が求められる光学素子の表面作製に用いられてきた。**IBF**の概念図を図 2.3.1 に示す。イオンが固体表面に当たると、固体原子との弾性衝突によって固体原子表面に運動エネルギーを与え、運動エネルギーを得た固体原子がさらに他の固体原子と衝突を繰り返すと、表面方向の運動エネルギーを持つ固体原子ができる。その中には、固体表面の障壁を乗り越えて表面から飛び出す原子が存在する。このように、固体表面へのイオンの入射によって表面から固体原子が飛び出す現象をスパッタリング現象という。この現象を利用して、原子オーダーでの加工、つまりイオンエッチング、イオンミリングを行うことができる。

主に高品質な光学素子を作製するため、**IBF**は用いられる。高輝度のビーム特性を備えた第三世代のシンクロトロン放射光源は、反射の際の損失を低減させるため非常に高品質な光学系が必要とされる。特に平面、球面、非球面ミラーにかかわらず、表面粗さと傾斜偏差誤差が最も重要な指標となる。例えば、100mmの平坦なミラー表面の傾斜偏差誤差は0.02 arcsec (0.1 μ rad) RMS 以下となることが要求される。したがって、サブミリメートルの空間波長のレベルで表面の決定論的加工が求められる。T. Arnold¹²⁾らによって行われた、**IBF**を用いたミラー表面の形状修正加工の研究結果の報告によると、100 mm \times 20 mmのSi平面基板において、研磨後の初期状態の表面形状誤差は11 nmRMS、P-V値で50.2 nmであったが、FWMHが2 mmのイオンビームを用い、形状修正加工を2回行ったところ、0.6 nmRMS、P-V値で5.7 nmと改善に成功している。**IBF**はスパッタリング現象を用いた加工であるため加工対象物を選ばないが、最表面の結晶構造を乱してしまうという特徴がある。

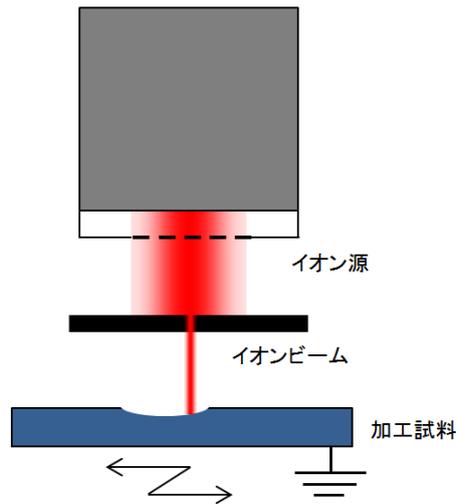


図 2.3.1 Ion Beam Figuring の概念図

2.3.2 Elastic Emission Machining^{13~21)}

Elastic Emission Machining (EEM)とは金属酸化物などの微粒子と加工物表面との固体間化学反応を利用した超精密加工法である(図 2.3.2)。超純水の流れにより、微粒子を加工物表面に供給すると、付着した微粒子表面の原子と加工物表面の原子が酸素を介し化学的に結合する。微粒子が流れにより除去される際、加工物表面の原子が自発的に除去されることにより、原子オーダーの加工を可能としている。他の化学的相互作用を利用した加工法と異なる大きな特徴は、固体表面間の化学反応を利用している事であり、なめらかな表面を有する微粒子を用いることで加工物表面の凸部が選択的に反応し除去され、原子レベルの平坦性が容易に得られることにある。得られる表面には加工変質層などのダメージが一切存在しないなど、高い結晶性が要求される分野においても利用可能である。微粒子と超純水の供給方法として、ノズル型 EEM と回転球型 EEM が提案されている。

ノズル型 EEM はノズル型加工ヘッドによって被加工物表面に高速せん断流を発生させ、被加工物に微粒子を供給し加工を行う方式である。この方式では、ノズルの大きさや形状、供給水圧を変更するだけで容易に加工条件を制御することができる。さらに、ノズルの滞在時間を数値制御することで、制御性の高い加工を実現することができる。

回転球型 EEM は、ヘッドの回転によってヘッドと被加工物との間に生じるわずかな隙間に高速せん断流を発生させ、その流れによって微粒子を被加工物に供給する方式である。回転球と被加工物との間には、安定な高速せん断流を発生させることが可能なため、EEM の加工原理に則したより理想的な加工を実現することが可能である。ノズル型はノズルの滞在時間を数値制御することができるので形状誤差を修正することに適しており、回転球型は表面粗さなど空間波長 0.3mm 以下の形状誤差の除去に効果を発揮する。

実際に EEM を用いて、形状誤差が 2 nm の楕円ミラー(長さ 125 mm)と双曲面ミラー(長さ

29 mm)が作製され、X線集光に用いる研究が報告されている²⁰⁾。また、微粒子にSiO₂を用いたノズル型EEMによってSi(001)ウエハを加工し、その加工領域をSTM(Scanning Tunneling Microscope)によって表面観察した結果が報告されており、原子レベルで平滑な表面が得られていることが直接的に観察されている²¹⁾。EEMは高い形状作製精度を持ち、加工後の表面粗さは小さいという特徴を持つといえ、今日では先に紹介したように高品質なX線光学素子の作製に主に用いられている。

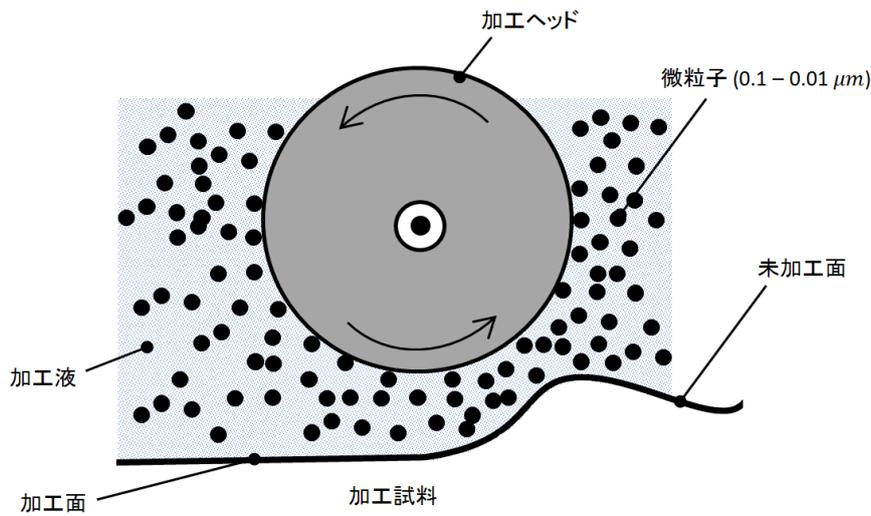


図 2.3.2 EEM の概念図

2.3.3 Plasma Jet Machining^{22~35)}

Plasma Jet Machining (PJM)とは、大気圧下でマイクロ波もしくは高周波電力を用いて発生させた非熱的・化学的反応性プラズマによるエッチングである。プラズマジェット源およびプロセスの概略図を図 2.3.3 に示す。プラズマジェット源はArやHeのような不活性ガスを供給しながら安定した放電を維持し、そこにフッ素含有反応性ガス(NF₃, CF₄, SF₆)や酸素ガスを混合する。反応性ガス分子はプラズマ中で結合が切れ化学的に反応しやすいフッ素ラジカルやその他の反応種となり、試料表面に衝突して揮発性物質を生成する。PJM加工に好ましい材料は、揮発性のフッ化物を生成することから、Si、SiO₂、SiC、ULE™などのケイ素含有化合物、およびタンゲステンのような金属である。また熔融石英の場合、主な揮発性物質としてSiF₄が生成されることが分かっている。加えて、ポリマーも酸素ガスを導入することで同様に処理することができる。プラズマジェットの加工形状は、おおよそ回転対称であり多くの場合ガウシアン関数の形に近い。

加工レートRはアレニウス方程式を用いて、以下の式で表すことができる。

$$R(x, y) = C \times j_r(x, y) \times \exp(-E_\alpha/k_\beta T(x, y)) \quad (2.3.1)$$

ここで、 C は材料の物性に依存する定数であり、 j_r は反応種の空間密度分布、 E_α は活性化エネルギー、 k_β はボルツマン定数、 T は試料の表面温度分布である。



図 2.3.3 プラズマジェット加工の様子

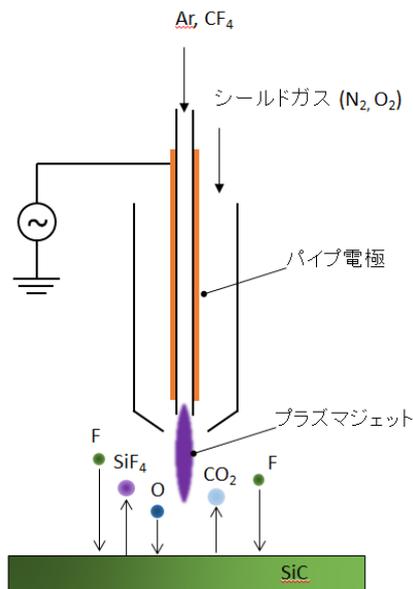
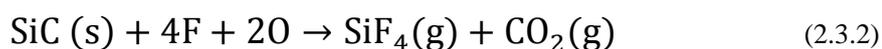


図 2.3.4 プラズマジェット発生 の原理と、試料(SiC)の表面原子と各ラジカルの化学反応による除去プロセス

SiC を加工する場合、不活性ガス中に CF_4 と O_2 を混合したガスを供給するが、下式の反応を満たすよう、試料表面近傍ではある程度の割合で F ラジカルと O ラジカルの存在が必要となってくる。



しかしながら、 CO_xF_y や SiO_x などの不揮発性の副生成物が試料表面に堆積し、エッチングを妨げるという現象が起きる。副生成物の堆積速度はラジカル密度などに依存するが、表面温度とも関係があり、エッチング速度は $150^\circ C$ 付近で著しく低下することが分かっている。

PJM は従来の機械研磨加工と比べ、機械的な力を加えないため試料にダメージを与えることはない。それに加え、研削、ラッピング、研磨など先行して行われる機械的的加工プロセスで生じた試料表面のダメージを PJM で除去することも可能である。しかし、純粋な化学的エッチングであるため、表面粗さは処理後に増加することがある。実際に Si や熔融石英、SiC などを PJM で加工した例が先行研究として報告されており、ナノオーダーの精度かつサブミリオーダーの空間分解能で加工することが示されている。例えばデモンストレーション実験として、T. Arnold らによって PJM を用いて作製された Si ウエハ上の SiO_2 層

の PJM 加工を行い、その膜厚の違いによる干渉色によってモナ・リザの写真画像が再現されている³⁵⁾。

2.3.4 Local Wet Etching^{36~40)}

Local Wet Etching (LWE)とは、エッチャントの供給部と吸引部を同軸上に配したノズルを用いて局所的な液相エッチング領域を形成し、ノズルもしくは加工物を速度制御走査することによって形状創成を行う無歪加工である。ノズルヘッドの滞在時間制御により決定論的に形状を創成することができ、化学反応により材料を除去するため、材料物性に影響を与える加工変質層が形成されないといったメリットを有する。図 2.3.5 は NC-LWE のシステム構成図であり、試料ホルダ、ステッピングモータで駆動する XY ステージ、エッチャント同軸ノズルヘッドとエッチャント循環ポンプから構成されている。ノズルヘッド部はエッチャント供給部と吸引部から成り立ち、同軸上に配置されている。また加工領域は吸引部の内側に限定される。エッチャント溶液はバランス良く供給と吸引がなされているため、ノズルから流れ出た後に試料表面に残ることはない。また、強制的にエッチャントを吸引することで、局所的に加工し、かつ加工領域を吸引スリット径と同程度にすることを可能にしている。単位加工痕に関しては、エッチャントが接触する領域でのエッチングレートは均一であるため、加工領域の断面形状は単純な円筒形となっている。したがって、さまざまな形状のノズルヘッドを採用することで、任意の形状とサイズを持った表面形状を作製することが可能である。加工レートは混合物およびエッチャントの温度によって制御可能であり、エッチャント供給ノズルの滞在時間を制御することで、試料表面を決定論的に加工することができる。したがって、試料表面のノズルの走査速度を単純にコントロールすることによって、精密な形状を用意に作製することが可能となる。

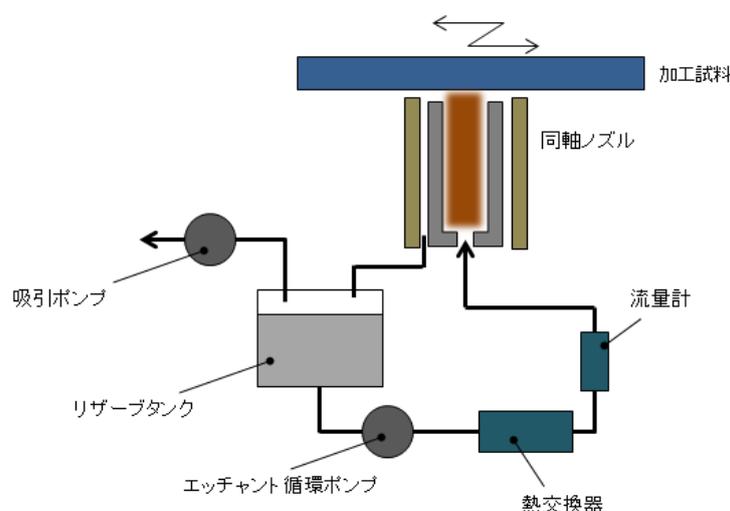


図 2.3.5 NC-LWE の概略図

K. Yamamura らによって行われた Local Wet Etching による合成石英ガラス製のフォトマスク基板の実験結果を紹介する⁴⁰⁾。基板の形状誤差はレーザー干渉計によって測定されており、加工前の平坦度は P-V 値で 260 nm であった。加工の送りピッチは 1 mm、フッ化水素酸の濃度と温度はそれぞれ 25 wt%、25°C、ノズル径は 15 mm であり、一回の加工で平坦度を 69 nm に改善することに成功している。この結果は、干渉計由来の円形の測定誤差が乗っていると考えられ、形状測定法の改善によってより精密に表面形状を作成することが可能であるとしている。また、加工前後で表面粗さは悪化しないことも報告されている。

2.3.5 Plasma Chemical Vaporization Machining^{41 ~ 50)}

加工後の結晶構造を乱すことなく機械加工に匹敵する加工能率と任意の形状創成能力を有する加工法として、Plasma Chemical Vaporization Machining (PCVM, プラズマ CVM) が開発されている。プラズマ CVM は図 2.3.6 に示すように、ハロゲンなどの電気陰性度の大きい原子を反応性の高い中性ラジカルに変えて加工対象物と反応させ、揮発性物質に変えることによって除去を行う加工法である。加工の素過程はケミカルエッチングと同様に原子単位の化学反応によるものであるため、幾何学的に優れた加工面を得ることが可能であると同時に、材料本来の性質を損なうことなく、結晶学的観点からも極めて優れた加工面の創成が期待できる。

加工の進行は反応ガスと加工対象物の組み合わせに大きく依存する。加工の高能率化を考慮すると、反応ガスとしては加工対象物と反応を起こしやすく、しかも生じた反応生成物が蒸気圧の高い揮発性物質になるようなものを選ぶことが重要となる。電気陰性度の大きい原子が加工対象物表面の原子と結合した場合、結合部において電子分極を生じ、加工対象物第 1 層、第 2 層との結合力が弱くなるため、表面原子の除去が容易になると考えられる。また、中性ラジカルと固体を反応させて揮発性物質に変える反応は純粋な化学反応のみに基づくため、転位の運動など材料内部に存在する欠陥に基づく機械的加工法と異なり、加工変質層を導入しない理想的な加工法であると言える。

プラズマを利用した加工法として、既に半導体素子製造の分野において、ドライエッチングプロセスとして実用化されている反応性プラズマエッチングがある。しかし、一般的に $10^{-3} \sim 1$ Torr の低圧力雰囲気中で行われるため、加工速度も小さく、プラズマの広がりにより加工の空間的な制御性が全くないため、この手法が既存の機械的加工法に置き換わることはあり得ない。その一方でプラズマ CVM では、大気圧、もしくはそれ以上の高圧力雰囲気中で高周波を用いることで、空間的に極めて局在化したプラズマを発生させ、高密度の中性ラジカルを生成することにより加工の能率と空間分解能を向上させている。このようにプラズマ CVM では従来の機械的加工法に迫る加工の能率と加工の空間分解能を得ることが期待される。プラズマ CVM には弱電離プラズマが用いられ、電離している荷電粒子

の割合は少なく、残りの多くが中性分子（原子）のみである。プラズマ内部では中性分子や電子、イオンなどが弾性、非弾性衝突を繰り返すことでエネルギーの授受を行っており、電離、励起、解離に加え、電子の付着や再結合、またはこれらが組み合わされた反応が起こっている。したがって、プラズマ内の中性分子は電子やイオンの衝突により、多くが励起状態にあるため、通常分子よりも活性で反応性に富んでいる。これを中性ラジカルと呼ぶ。

Si のプラズマエッチングには一般的に SF₆ などのフッ素系ガスが用いられる。フッ素は電気陰性度 4.0 と高く、Si との反応生成物である SiF₄ の蒸気圧が高いことから反応後の表面からの脱離が容易に行われるためである。プラズマ内で解離・生成した中性のフッ素ラジカル F* と表面の Si 原子は次の反応を起こす。



加えて、試料表面の Si 原子と反応するのはプラズマ中で解離した中性ラジカル F* だけではなく、SF₆ や F₂ などが Si 表面に吸着した場合を考えると、それらの解離エネルギーの減少がみられることが分かっている⁴⁸⁾。これは Si 側から吸着分子へ電子が流入する事により、分子の局所エネルギーが減少し、分解に至るためである。したがって、解離していない SF₆ やプラズマ内で発生した SF_x (x = 1 ~ 5) が表面に吸着した場合においても、エッチングに必要なフッ素原子を供給することとなる。

プラズマ CVM を用いた SOI ウエハの Si 層の薄膜化及び膜厚均一化加工の先行研究結果を紹介する。SOI (Silicon on Insulator) ウエハとは、Si 基板の上に厚さ数百 nm の Si 酸化膜層と数 nm ~ 数十 nm の Si 薄膜層を形成した 3 層構造の半導体基板である(図 2.3.7)。中に埋め込まれた Si 酸化膜層がデバイス使用時のリーク電流を防止し、寄生容量の低減させる役割を果たす。このことから高性能半導体デバイス用基板として、コンピュータや家庭用ゲーム機の CPU、モバイル機器向けのデバイスなど広く用いられている。SOI ウエハを用いて MOSFET を作製するとき、各素子のしきい値のばらつきを抑えるため、ウエハ内の Si 薄膜層膜厚のばらつきは膜厚の ±0.5 % 以内であることが求められる。Y. Sano⁵¹⁾らは、市販の φ 8 インチ SOI ウエハに対して NC-PCVM を用いて加工を行い、φ 190 mm の領域において Si

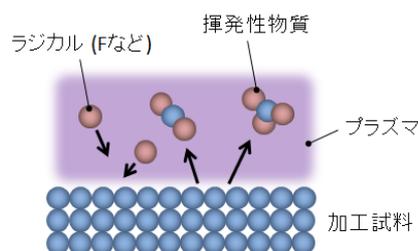


図 2.3.6 プラズマ CVM の加工概念図

薄膜層の膜厚が $97.5 \pm 4.7 \text{ nm}$ であったものを $7.5 \pm 1.5 \text{ nm}$ と高精度な Si 層の薄膜化および膜厚の均一化に成功している。このように PCVM は非常に高い加工精度を持った決定論的加工法である。

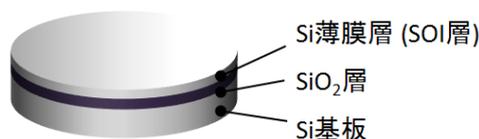


図 2.3.7 SOI (Silicon on Insulator) ウエハ

2.3.6 大気圧プラズマ犠牲酸化法

大気圧プラズマ犠牲酸化法の概念図を図 2.3.8 に示す。まず電極と試料の間に高圧力雰囲気下で高周波電圧を印加する事により局在化した大気圧プラズマを生成し、雰囲気中に混在させた酸素をラジカル化させる(図 2.3.8 (a))。次に酸素ラジカルは化学反応性が高いため試料表面の Si と反応し、酸化膜を形成する(図 2.3.8 (b))。最後に形成した酸化膜を、フッ化水素酸を用いて除去することで加工が完了する(図 2.3.8 (c))。このように本加工法はケミカルエッチングと同じく化学反応のみに基づく。したがって大気圧プラズマ犠牲酸化法は、転位の運動など材料内部に存在する種々の欠陥に基づく従来の機械的加工法とは異なり、加工変質層を導入しないため原子単位での加工が可能である理想的な加工法と言える。一方で、プラズマにより生じた酸素の中性ラジカルを用いた酸化反応は数十 nm で飽和するため一度の加工量に上限があるといった問題もあるが、PCVM と比較すると、

- ① 酸素ラジカルによる単純な酸化反応であるため、Si のエッチングに一般的に用いられる CF_4 や SF_6 といった地球温暖化係数の大きなフッ素系のガスを使用しない点において、クリーンかつ安全である。
- ② 酸化膜以外の反応性生物や反応生成ガスが無い場合、安定した雰囲気での加工が可能であり、排ガス処理装置が不要である。
- ③ 酸素と希ガスのみを用いるため、装置作製にあたり耐食性に関する検討が不要である。

といった特徴がある。

直流電界によってプラズマを発生させる場合、プラズマ中で生成された荷電粒子は電界に沿って運動するため加工面への衝突が避けられず、加工面の温度上昇や結晶学的なダメージを考えると極めて不都合な現象であると言える。このため大気圧プラズマ犠牲酸化で

はこのような影響を抑制するため、荷電粒子をプラズマ空間内で補足する事を考え高周波電界を用いている。電源周波数を f とおくと、交流電界中における荷電粒子の最大振幅 A_{max} は以下の式で表すことができる。

$$A_{max} = \frac{eE_0}{m \cdot (2\pi f)^2} \quad (2.3.4)$$

ここで、 ω は角振動数、 e は素電荷 ($1.60217646 \times 10^{-19}$ C)、 E_0 は電界強度の振幅、 m は荷電粒子の質量である。この式 (2.3.4) を用いてプラズマの発生電界強度 $E_0 = 6 \times 10^6$ V/m とした場合のいくつかの荷電粒子に対する最大振幅 A_{max} を、電源周波数 $f = 13.56$ MHz 及び 150 MHz について示す(表 2.3.1)。なおそれぞれの荷電粒子の質量 m は各元素の質量数をアボガドロ定数 (6.0221415×10^{23} mol⁻¹) で割った値であり、質量数は He : 4.003, H : 1.008, O : 16.00 の値を用いた。また、実際には荷電粒子は運動中に他の粒子と何度も衝突を繰り返すので、荷電粒子の振幅は表 2.3.1 の値よりももっと小さくなる。表 2.3.1 より、周波数の高い電源を用いてプラズマを発生させた方が荷電粒子の振幅が小さくなり、それに従いウエハ加工面へのダメージも少なくなることが分かる。しかしながら、本研究では大気圧下においてプラズマを発生させる。大気圧下では荷電粒子の平均自由行程は非常に短くなり、例を挙げると He では 1 atm において約 1 μ m となる。これは表 2.3.1 の値より二桁以上も小さいので、両周波数におけるその振幅の差は無視できる程小さくなると考えられる。

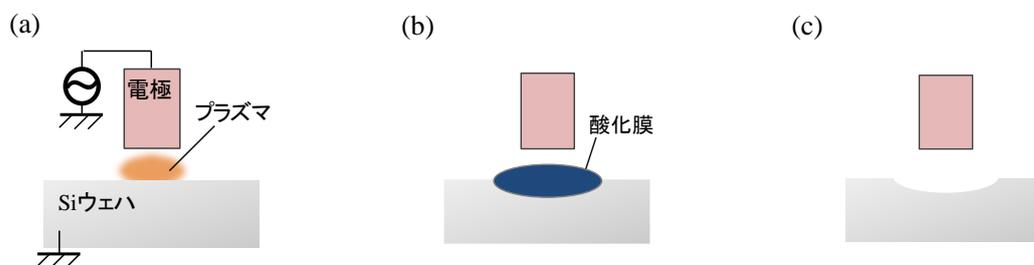


図 2.3.8 大気圧プラズマ犠牲酸化概要 (a) 局所プラズマ, (b) 酸化膜形成, (c) 酸化膜除去

表 2.3.1 各荷電粒子に対する最大振幅 A_{max} 値

電源周波数 f [MHz]	最大振幅 A_{max} [mm]		
	He ⁺	H ⁺	O ⁻
13.56	19.92	79.12	4.98
150	0.163	0.647	0.041

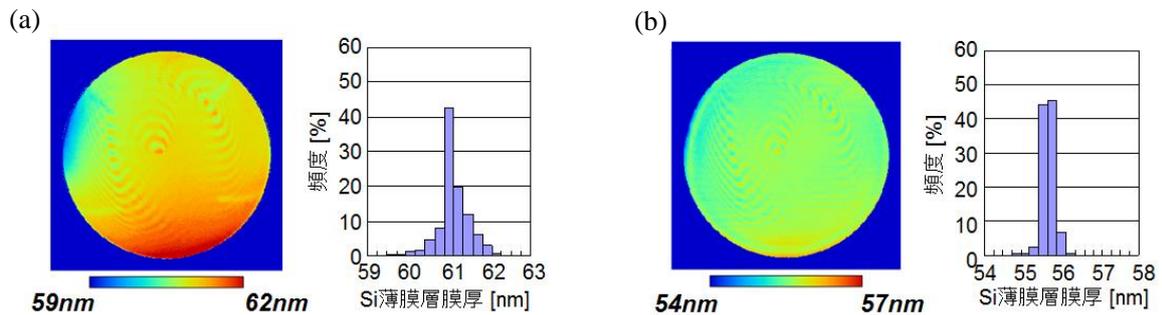


図 2.3.9 数値制御大気圧プラズマ犠牲酸化法による SOI ウェハ Si 薄膜層膜厚均一化加工
(a) 加工前、(b) 加工後の Si 薄膜層膜厚分布

数値制御大気圧プラズマ犠牲酸化法を用いて数値制御加工が行われた先行研究について紹介する。Y. Sano⁵²⁾らは、市販のφ300 mm の p 型 SOI ウェハを用い、約 60 nm の膜厚の Si 薄膜層に対して膜厚均一化加工を行った。Si 薄膜層の膜厚が 10 nm のとき、要求される Si 薄膜層の膜厚均一性は P-V 値で 1 nm 以下となるが、これに対し、図 2.3.9 はそれぞれ反射分光法で測定した加工前後の Si 薄膜層の膜厚分布を示しており、膜厚均一性を P-V 値：2.4 nm から 0.9 nm に改善することに成功している。

2.4 全面一括型決定論的加工法⁵³⁾

ラスタースキャン型決定論的加工法では、すでに数百 mm の領域に対してナノメートルオーダーの精度の加工が可能となっており、現在ではすでに超精密な形状が求められる高品質な光学素子の表面形状修正加工に用いられている。しかしながらこれらの手法は、走査のために XY ステージが必要なことから加工装置が大掛かりとなり、また大面積を加工するには数時間から数十時間と、非常に長い時間を要する。大量生産が求められない高精度の光学素子であれば問題はないが、半導体デバイス用基板などは大量生産が必要であり、その際に求められるスループットは一枚あたり 10 分程度である。加えてラスタースキャン方式では、半導体基板の大口径化、加工の高分解能化によって走査距離が長くなるため、ガス濃度や組成、圧力などのパラメータを最適化したところで、加工時間を桁違いに短縮することは極めて困難である。そこで本研究では、図 2.4.1 (a) のように単一の加工ヘッドを用いるのではなく、同図(b)のように複数の加工ヘッドを用いて一括処理を行う事のできる多電極全面一括型加工を提案した。ウェハ全面を一括して加工できるよう多数の加工ヘッドを並列に隙間なく並べ、個々の加工ヘッドを独立して制御することで任意の領域で加工時間を制御し数値制御加工を行う。高精度加工が実現されるものの処理時間が長く導入が見送られていたラスタースキャン型の決定論的加工を、全面一括型加工の概念を用いて加工能率を格段に向上させることで生産現場への導入が期待され、コストを抑えた加工の高

精度化が達成される。

ラスターキャン型と全面一括型についての比較を表 2.3.1 に示す。ラスターキャン型では加工精度は加工時間制御によって決まるため、高い加工精度を実現でき、加工の空間分解能は単位加工痕のサイズと任意に設定する送りピッチに依存するため、高分解能化が可能である。しかし、上で述べたように加工面積が大きくなるほど、送りピッチが細くなるほど長く処理時間はかかることとなる。一方、全面一括型は加工精度についてはラスターキャン型と同じく加工時間制御によりナノオーダーの精度で精密に制御することが可能であるが、加工分解能は加工ヘッドのサイズに依存するため高分解能化に限界がある。しかし、処理時間は最も加工が必要な領域の加工時間と等しくなるため、格段に処理時間を短くすることが期待できる。

全面一括型加工のコンセプトを実現するために必要な条件は二つある。一つ目はそれぞれの加工ヘッドの独立制御であり、多数並べた個々の加工ヘッドの加工時間を個別に制御できなければ決定論的加工を行うことは不可能である。二つ目は省スペースな加工ヘッドであり、加工ヘッドが加工領域より大きい場合、加工できない領域が生じてしまい、試料全面に加工を行うことはできない。そのため加工ヘッドが、省スペースであること、つまり加工ヘッドが単位加工痕と同等かそれより小さい必要がある。この条件に沿って全面一括型のコンセプトを実現可能な加工原理を検討していくと、**IBF** に関しては、加工時間を個別に制御可能であるが、加工ヘッドが単位加工痕に対して大きすぎるため省スペースな加工ヘッドという条件を満たすことはできない。**PJM** についても同様に単位加工痕のサイズに対して加工ヘッドが大きすぎるため不適である。**EEM** に関しては、ノズル型 **EEM** であれば、加工ヘッドをノズルを多数並べることは可能であるが、加工液が横方向に広がり加工ヘッドを個別に加工時間制御を行うことは難しいと思われる。しかし、**PCVM** や **NC** 犠牲酸化など大気圧プラズマを用いた加工であれば、プラズマ発生用の電極を個別制御することは容易で、かつ電極を並べて加工することが可能であると考えられる。つまり大気圧プラズマを用いれば、先に挙げた二つの条件を満たすことができ、全面一括型加工を実現することができると思われる。

大気圧プラズマを用いて全面一括型数値制御加工を行うため、大気圧プラズマの **ON-OFF** 制御について検討する。大気圧プラズマを発生させるためには、プロセスガスと、電極試料間の高周波電界の二つが必要となり、このどちらかを制御すれば大気圧プラズマの **ON-OFF** 制御が可能である。プロセスガスを個々の加工ヘッド毎に制御することを考えたとき、個々の電極にガスの供給口と排出口を設ける方式が考えられる。しかし、ガスは必ず横方向に拡散し個々の電極領域内でガスの供給を制御することは現実的には難しいため、本研究では電極試料間の電界強度制御に着目した。そして、それぞれ異なる特徴を有する、電極試料間の電界強度を制御する手法を二つ考案した。一つ目は電極試料間のギャップを制御するギャップ制御型である(図 2.4.2(a))。これは電極上部にアクチュエータを取り付け、電極を引っ張り上げることでギャップを広げ電界強度を弱めプラズマを消滅させる手法で

ある。アクチュエータの大きさよりも加工の分解能を小さくすることはできないが、電極の上下動のストロークを長くすれば大電力を投入可能であり高い加工速度を得ることができる。そのため、ギャップ制御型の全面一括型加工は高速な形状修正加工に適しているといえる。二つ目は電極の電圧制御型である(図 2.4.2(b))。これは電極にスイッチング回路を設け、その ON-OFF によって電圧を制御する方法で、スイッチング素子の耐圧があるため、投入できる電力には限界があるが、スイッチング回路が微小であるため、電極も小型化することができ高分解能化が可能である。こうした特徴から、短周期の形状修正加工で強みを発揮できる手法となる。この二つの手法による全面一括型加工について、次章以降に詳細に述べる。



図 2.4.1 多電極型装置の概念 (a) 単電極全面走査型、(b) 多電極一括処理型

表 2.3.1 2つの手法における各性能の決定要因

ラスタースキャン型加工		全面一括型加工	
加工精度	加工時間制御 ○	加工時間制御	○
空間分解能	単位加工痕・送りピッチ ○	加工ヘッドのサイズ	△
処理時間	加工面積・送りピッチ ×	最も加工量が必要な領域の加工時間	◎

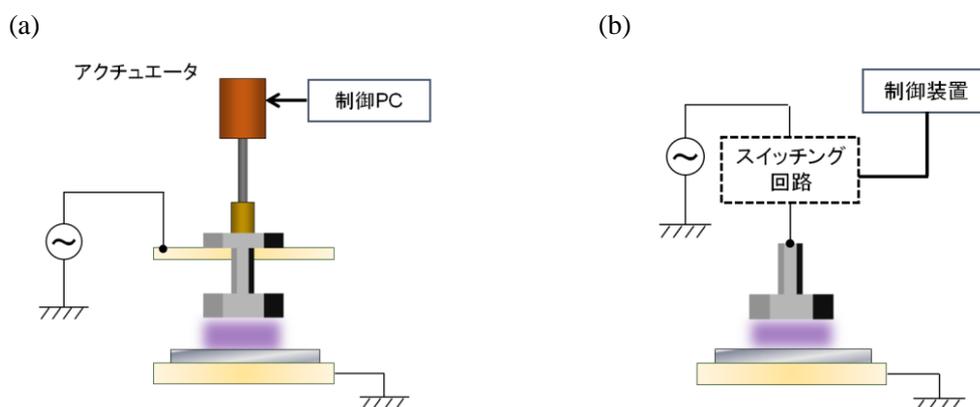


図 2.4.2 電極試料間の電界強度を制御する手法 (a) ギャップ制御型、(b) 電圧制御型

2.5 結言

本章では、局所的に精密加工が可能な加工ヘッドと送り速度制御が可能な精密 XY テーブルから成る従来のラスタースキャン型「決定論的加工法」について、これまでに開発されてきた種々の加工法の加工原理と実績に関して述べた。そして、本研究で提案する多電極全面一括型「決定論的加工法」のコンセプトを述べ、それを実現するための二つの方式について述べた。以下に本章の要約を述べる。

- 1) ラスタースキャン型決定論的加工法においては、局所的に精密加工が可能な加工ヘッドと送り速度制御が可能な精密 XY テーブルを用い、形状誤差の大きい場所ではテーブルの送り速度を遅くすることで加工ヘッドの滞在時間を長くして加工量を増やし、形状誤差の小さい場所では高速な送りにより滞在時間を短くして加工量を減らしながら、被加工物全面を走査加工することによって、形状誤差を修正するものであることを述べた。
- 2) イオンと試料の弾性衝突、金属酸化物などの微粒子と加工物表面との固体間化学反応、プラズマ中のラジカルと試料表面原子の化学反応、化学反応製液体を試料表面に局所的に吹き付ける液相エッチング等、様々な加工原理に基づく従来の決定論的加工法についてその概要を述べた。
- 3) ラスタースキャン型は、特に被加工物面積が大きい場合や、加工の横方向空間分解能を向上させるため小径の加工ヘッドを用いる場合においては、加工に長時間を要することから、大量生産が必要となる対象には適用困難であることを述べた。
- 4) 多電極全面一括型決定論的加工法のコンセプトについて述べ、それを実現するための具体的な方法として、個々の電極のプラズマを独立に ON/OFF 制御するために、個別に電極試料間距離を制御する方式と個別に印加電圧を制御する方式の 2 方式を提案した。
- 5) 個々の電極の電極試料間ギャップを制御するための、アクチュエータを用いた電極試料間ギャップ制御型の手法について述べた。本機構により、電極と試料との距離が小さい場合はプラズマの発生に十分な電界強度が得られるが、電極が上部に引き上げられ電極試料間ギャップが拡大しているときは電界強度が弱まることでプラズマが消滅すると考えられる。
- 6) 個々の電極の電圧を ON-OFF 制御する電圧制御型の手法について述べた。電極に直接接続したスイッチング素子によって電極に投入される電力の ON-OFF を行い、プラズマの発生と消滅を制御する。

提案する全面一括型数値制御加工は、薄膜層の膜厚均一化加工や表面形状修正加工を高効率に行うことができる革新的な加工法となる。それだけでなく、ウエハ自身の厚み調整

加工に適用出来る可能性が極めて高く、将来的には SiC などの難加工機能材料のエッチング加工によってウエハ厚み調整に適用可能なことが期待できる。さらに、高精度加工が実現されるものの処理時間が長く導入が見送られていたラスターキャン型のプラズマエッチングを全面一括型に置き換え加工能率を格段に向上させることで生産現場への導入が期待され、コストを抑えた加工の高精度化が達成される。将来的に、量産技術を革新させる可能性を秘めているといえる。

第 3 章 電極試料間ギャップ制御型多電極大気圧プラズマ発生装置の開発

3.1 緒言

ラスターキャンに代わる、高能率な決定論的加工を実現する手法として全面一括型加工を前章で提案し、電極試料間ギャップ制御型と電極電圧制御型という二つの手法を考案した。本章では、電極試料間ギャップ制御型による多電極全面一括型数値制御加工について述べる。考案した多電極全面一括型装置における電極の形状とサイズや、試作した装置の加工特性を詳細に調査した。そして、同装置を用いて実際に $\phi 8$ inch SOI ウェハ 6 分の 1 領域を数値制御により均一化加工した結果について述べる。

3.2 多電極大気圧プラズマ発生装置の概要

3.2.1 プラズマの制御手法

ギャップ制御型を実現するためのアクチュエータとして、本研究ではソレノイドコイルを用いた。図 3.2.1 にソレノイドコイルを多電極装置に適用した電極駆動機構の概略図を示す。コイルに電流を流すと磁束が発生し、固定鉄芯と可動鉄芯との間に作用する磁力により電極を上方向に引き上げるが (図 3.2.1 (a))、通電を切ると電極の自重により元の状態となる (図 3.2.1 (b))。ソレノイドコイルは小型のものを入手することが容易であり、十数 mm 程度の電極を並列に隙間なく並べることが可能となる。また、磁力の ON-OFF を外部の PC から個別に制御することができ、多電極全面一括型のコンセプトに非常に適しているといえる。

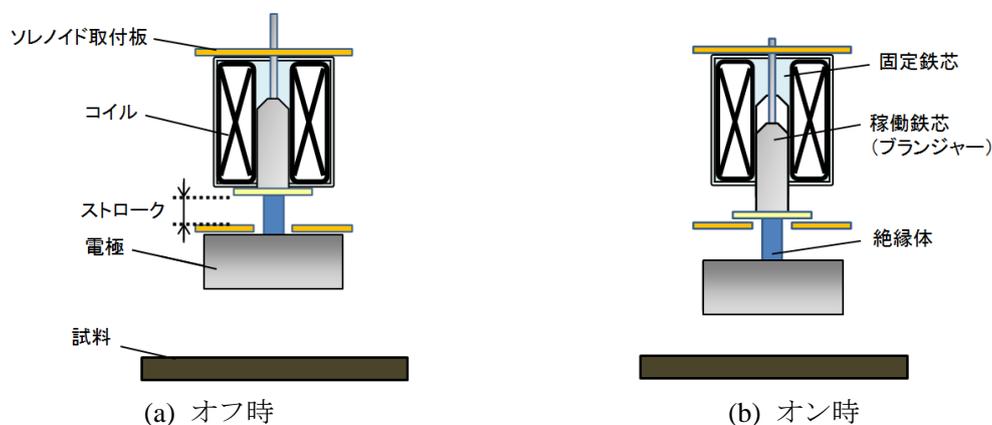


図 3.2.1 ソレノイドコイルによる電極駆動機構

3.2.2 シミュレーションによる電極サイズの検討

多電極実験装置を設計するにあたり、加工分解能を決定する主な要因となる電極の大きさについて検討する。提案する全面一括型加工は半導体デバイス用基板などの大量生産が必要なプロセスへの応用を念頭においている。したがって、加工試料として半導体基板を想定し、多くの基板は円形であることから電極の底面形状は六角形とした。電極のサイズに関しては SOI ウェハを例にとり検討した。まず、市販の $\phi 300$ mm SOI ウェハに対して分光エリプソメトリ測定を行い、Si 薄膜層膜厚分布を取得した。次に、電極の大きさをパラメータとして、得られた Si 薄膜層膜厚分布を基に加工後の SOI ウェハの P-V 値を算出するプログラムを作成し、あらゆる電極の大きさに対してシミュレーションを行った。ここで、電極の底面形状は正六角形とし、電極直下のみに均一な加工が行われるものとした。また、P-V 値を算出するにあたりエッジエクスクルーション(Edge exclusion; EE)を 10 mm とし、その場合の元の SOI ウェハの P-V 値は 2.4 nm であった。シミュレーションの結果を、横軸に電極断面における正六角形の対辺長さ、縦軸に加工後における Si 薄膜層膜厚分布の P-V 値として図示したものを図 3.2.2 に示す。また、図 3.2.3 には加工前、及び電極の対辺長さをそれぞれ 14 mm、4 mm としてシミュレーションした場合の Si 薄膜層膜厚分布を示す。図 3.2.2 より $\phi 300$ mm SOI ウェハの膜厚分布を P-V 1.0 nm 以下にするためには、六角形電極の対辺長さを 20 mm 以下にする必要があるとわかる。

市販の SOI ウェハだけでなく、一般に修正が必要な形状誤差は研磨加工等の不均一性などに由来するが、その空間波長は基板サイズの数分の一から数十分の一であり、基板の大きさを数百 mm とするなら加工分解能は十数 mm 程度あれば良いといえる。そのため電極の作製が容易で、かつ一般的に入手できる小型ソレノイドコイルのサイズを考慮し、電極の六角形の対辺の長さを 14 mm と決定した。

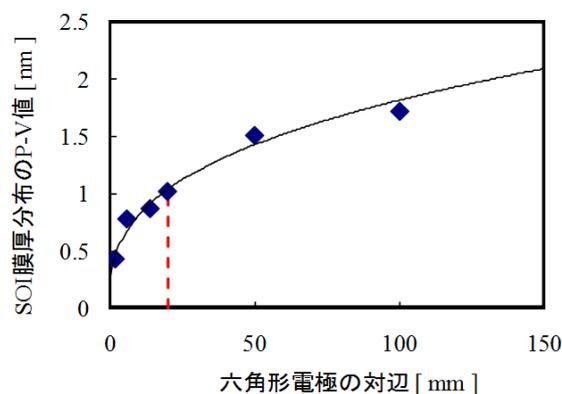


図 3.2.2 Si 薄膜層膜厚分布の電極の大きさ依存性

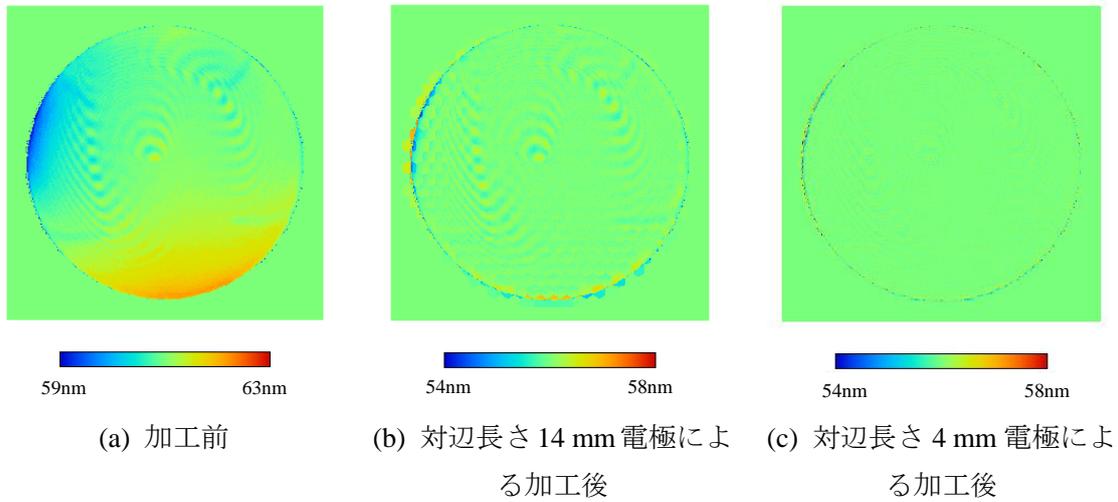


図 3.2.3 シミュレーションによる Si 薄膜層膜厚分布.

3.2.3 装置構成

図 3.2.4 に試作した装置断面の概略図を示す。ソレノイドコイルと電極が対になった機構を並列に並べ、電極間にはスペースを設けず電極同士が接触するように配置した。また、電極はアルミニウム合金製の対辺間長さ 14 mm の六角形のものを採用した。

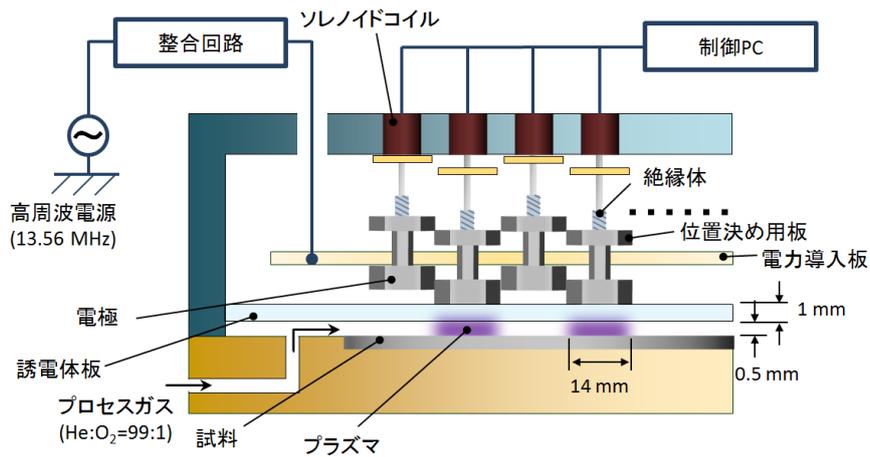


図 3.2.4 装置断面概略図

電極上部にはソレノイドコイルにより電極の駆動を可能にするための可動鉄芯を取り付け、電極と可動鉄芯の間にはプラズマを発生させるための高周波電力がソレノイドコイルに伝達されるのを防ぐため絶縁体を設けた。また、試料-電極間のギャップは各電極で等しくなるよう各電極には位置決め用の板を設けた。電力は 13.56 MHz の高周波電源から整合回路を介して電力投入板に供給され、各電極に供給される。各電極は接触しているので、理論上は同電位になっている。試料台φ8 インチサイズのウエハを置くことができ、試料台下部からプロセスガスを導入する。また、図中に示すように電極-ウエハ間にはプロセス内の気密性を保つための誘電体板があり、この内部すなわち誘電体板-ウエハ間にプロセスガスを供給してプラズマを発生させる。このようにプラズマが直接電極に接触しない構造のため電極表面に絶縁膜を形成する必要がなく、プラズマがアーク放電に移行することもない。また、可動部である電極が被加工物であるウエハに対して誘電体板で区切られているため、電極材料やソレノイドコイル等の部品からの汚染もないのでウエハをクリーンな状態で加工できる。図 3.2.5 に装置の全体写真を示す。電極の個数は 55 個であり、φ8 inch ウエハの 6 分の 1 の領域に配置している。その様子を図 3.2.6 に示す。図 3.2.7 には、装置上方から見た時の電極の位置に対して電極毎に番号を割り振ったものを示す。すなわち装置下方から見た図 3.2.6 の電極位置とは鏡面の関係となる。



図 3.2.5 装置全体写真

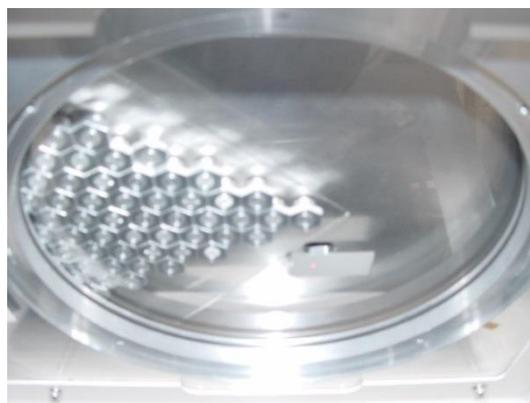


図 3.2.6 電極の配置写真

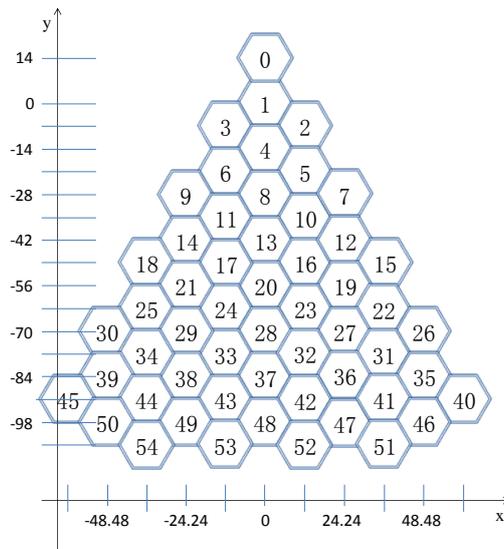


図 3.2.7 各電極の電極番号

3.3 多電極大気圧プラズマ発生装置の加工特性

試作した多電極大気圧プラズマ発生装置を用いて数値制御加工を行う為には任意のパターンでプラズマを発生できる事、どの電極でも均一な酸化膜が形成できる事、酸化膜厚の酸化時間依存性が明らかである事が必要である。また、プラズマを順次消灯させながら加工が進められていくため、プラズマ点灯面積が大きく変化する事となる。その結果、加工中の酸化膜厚の制御性が悪化する可能性が考えられる。

本節では、これらの酸化特性について検証した結果について述べ、最後にφ8インチ SOI ウエハの Si 薄膜層厚均一化を試みた結果について述べる。

3.3.1 プラズマの個別制御性

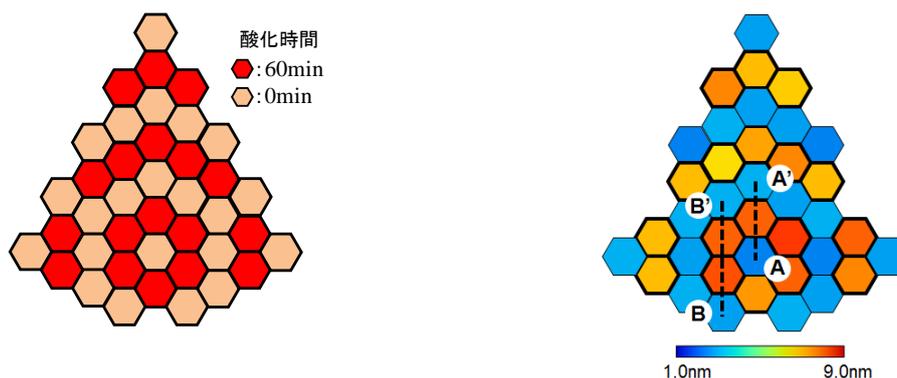
試作装置において個別にプラズマを制御可能であるかどうか検証する実験を行った。任意のパターンでプラズマが発生可能であることを示すため、図 3.3.1(a)に示すように、赤で示した電極のみプラズマを発生させ、それ以外の電極ではプラズマを消滅させた状態で Si ウエハを 60 分プラズマ酸化させる実験を行った。分光エリプソメトリを用いて測定した、得られた全体の酸化膜厚分布を図 3.3.1(b)に示す。測定は各電極の中心部のみ行った。結果から分かるようにプラズマを発生させた電極領域のみ酸化膜が形成されており、それ以外の領域の酸化膜の膜厚は自然酸化膜程度となっている。また周囲が完全にプラズマで囲われている電極も確実にプラズマが OFF 状態になっていることが確認できる。

また、1つの電極によって形成される酸化膜厚の分布は、数値制御加工を行う上で非常に重要な意味を持つ。各電極によって形成される酸化膜厚分布が電極面積を上回る広さの領

域に広がる、もしくは電極面積より小さい場合、精密な数値制御加工を行うことはできない。そこで、孤立した電極によって形成される酸化膜厚分布を調べた。図 3.3.1(b)の図中に示した点線 A-A'および B-B'上を 1 mm ピッチで酸化膜厚を測定した結果を図 3.3.2 に示す。図中の緑で示した電極直下の領域でのみ酸化膜が形成されていることが確認できる。点線 A-A'上の A 付近の領域は周囲を発生したプラズマで囲まれた箇所であるが酸化は行われておらず、また電極間の境界部も隙間なく酸化膜を形成できていることが分かる。以上の実験結果から、個々の電極のプラズマの ON-OFF 制御は正確に行うことができ、形成される酸化膜の空間分解能は電極サイズに等しいことが確認できた。

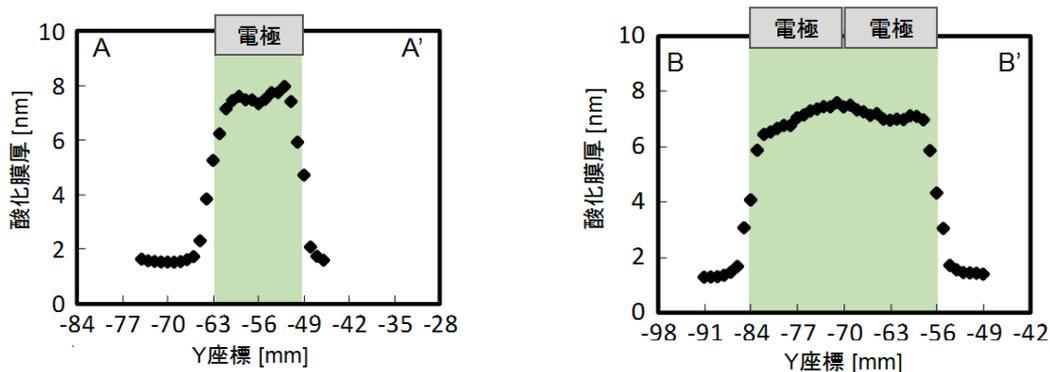
表 3.3.1 酸化膜分布の分解能調査での実験条件

投入電力	200 W
プロセスガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
酸化時間	60 min
プラズマ点灯電極数	18 個



(a) プラズマを発生させた電極の分布 (b) 得られた全体の酸化膜厚分布

図 3.3.1 プラズマを点灯させた電極の分布



(a) 図 3.3.1(b) A-A' 上の詳細な分布 (b) 図 3.3.1(b) B-B' 上の詳細な分布

図 3.3.2 得られた酸化膜厚分布

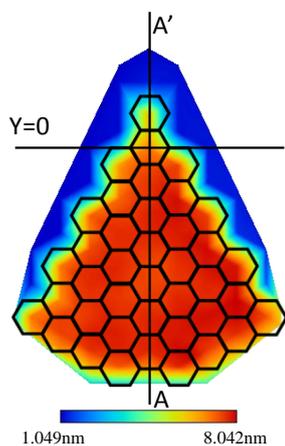
3.3.2 均一酸化実験

全ての電極でプラズマを発生させ、均一性を評価した。表 3.3.1 にその実験条件を、図 3.3.3 に得られた酸化膜厚分布を分光エリプソメトリによって評価した結果を示す。なお、反応ガスは図中下方より上方へ向けて流れている。また、図中の六角形は電極の位置を表しており、各電極の中心と辺の midpoint での酸化膜厚を測定する為、測定点は 7 mm 間隔とした。

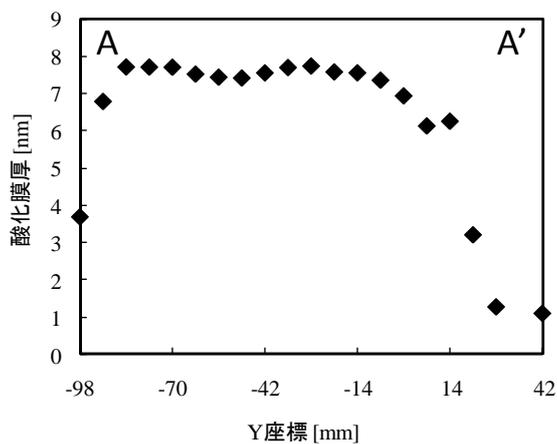
この結果から、酸化した領域の大部分において同様の厚みを持った酸化膜が形成されている事が分かる。図 3.3.3 (a) に示した A-A' 線上の膜厚分布を見ると、Y=-91 から Y=0 の領域にかけて ± 0.5 nm という高い均一性が得られている。一方、Y=7 および Y=14 や、電極群の最外周部においては酸化膜厚が小さい。これは、十分な酸化速度を持つプラズマが電極に等しい面積まで広がらず、プラズマ点灯領域の外縁部においては酸化量が小さくなっていったためと考えられる。なお、測定に用いた分光エリプソメータでは、指定した測定点の周囲およそ 2 mm×9 mm 程度の範囲の膜厚平均値が測定されるため、隣接する非酸化領域の影響によって酸化膜厚が実際よりも小さく評価されてしまった影響もあると考えられる。

表 3.3.2 均一酸化実験の条件

投入電力	300 W
プロセスガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
酸化時間	60 min



(a) 2 次元的分布



(b) A-A' 上の膜厚分布

図 3.3.3 全面均一酸化によって得られた酸化膜厚分布

3.3.3 酸化膜厚の酸化時間依存性

数値制御酸化を行う為に、酸化膜厚の酸化時間依存性を調べた。一般に酸化膜厚は酸化開始直後には酸化時間にはほぼ線形比例して急速に成長するが、ある程度反応が進んだ後はその酸化速度は非常に緩やかなものとなる事が知られている⁵⁶⁾。

そこで、全電極でプラズマを点灯させた時、酸化時間によってその酸化膜厚がどのように変化するかを調べた。表 3.3.2 に実験条件を、図 3.3.4 に得られた酸化膜厚の平均値を示す。なお、平均値の算出には電極の中心および辺上の測定点全ての酸化膜厚を用いた。この結果から、300 W を投入した場合の酸化膜厚の時間依存性が明らかになった。また、グラフの傾きから、60 min 程度までが線形領域に含まれる事、120 min 以後の酸化で尚も酸化膜の成長が見込まれる事が分かった。

更に、各電極における酸化膜厚の時間依存性を図 3.3.5 に、各酸化時間で得られた酸化膜厚の2次元的分布を図 3.3.6 にそれぞれ示す。この結果を見ると、電極によって酸化膜厚に差異が認められるが、各電極の酸化膜厚に関して図 3.3.4 のような時間依存性の関係を求める事ができ、それらを用いて数値制御加工が可能であると考えられる。

表 3.3.3 酸化特性調査の実験条件

投入電力	300 W
プロセスガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
酸化時間	10、20、30、60、120 min

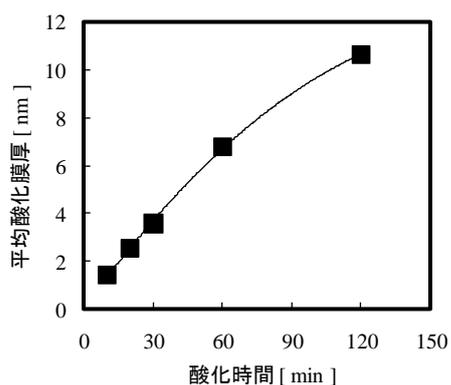


図 3.3.4 平均酸化膜厚の時間依存性

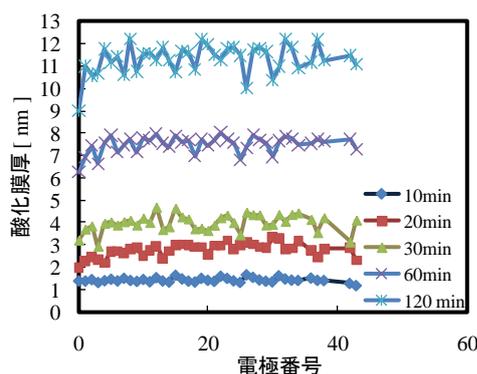


図 3.3.5 各電極における酸化膜厚の時間依存性

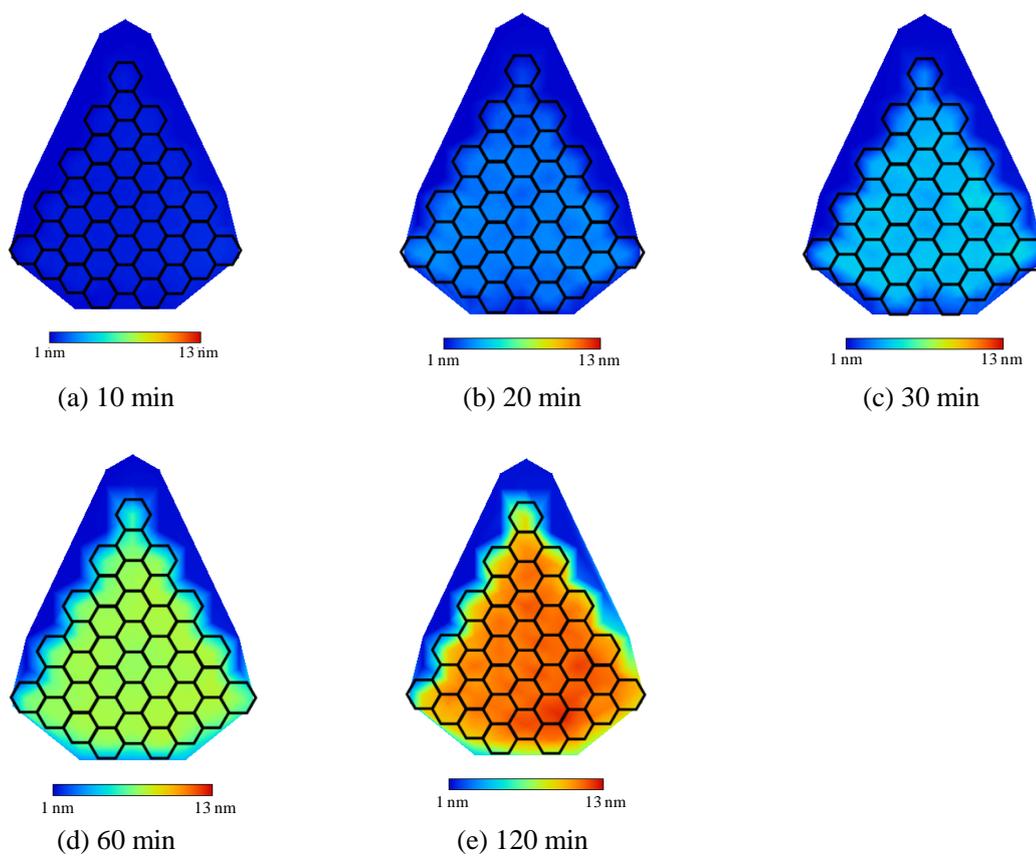


図 3.3.6 各酸化時間における酸化膜厚分布

3.3.4 電極電位の上昇による酸化速度の増加

数値制御酸化を行う際には、加工の進行に伴って順次プラズマを消灯させていく事となる。この時、プラズマ全体に投入される電力が実験開始時から変わらず一定である場合、プラズマ点灯領域の単位面積あたりの投入電力が上昇していく。それにより、プラズマ中の反応種の増大や試料の加熱などを生じ、酸化速度が増加する事が考えられる。

こうした電力密度上昇による影響を確かめる為、電極群を 3 つの領域に分け、それぞれの領域に異なる酸化時間を割り振って酸化を行った。表 3.3.4 に実験条件を、図 3.3.7 に各電極の酸化時間をそれぞれ示す。

表 3.3.4 電極電位上昇の影響調査における実験条件

投入電力	300 W
プロセスガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
酸化時間	20、30、60 min

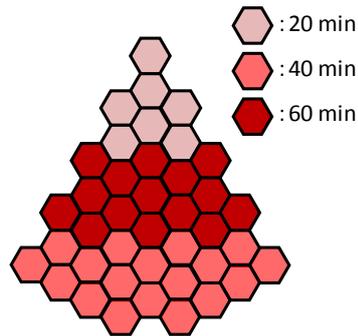
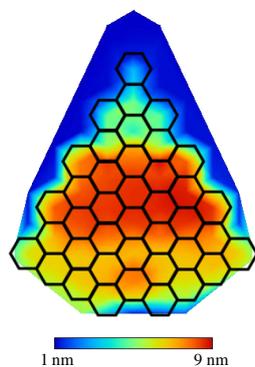
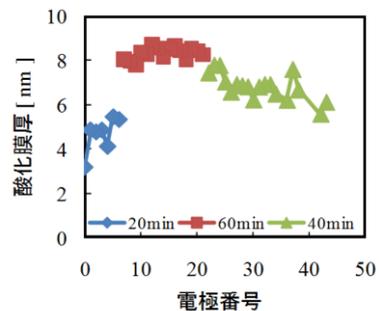


図 3.3.7 酸化時間の分布

また、その結果得られた酸化膜厚分布を図 3.3.8 (a)に、各電極における酸化膜厚を同図(b)に示す。これらの図から、それぞれの領域においてその酸化時間に応じた酸化膜厚が形成されている事が分かる。なお、40 min 酸化領域において、下部 (電極番号 37)に若干酸化量の多い部位があるが、この点は実験中にプラズマが所定の時間に消灯せず、長時間酸化されていたためと思われる。これらの酸化膜厚を各領域について平均し、図 3.3.2 の全面均一酸化時の平均酸化膜厚と比較したものを図 3.3.9 に示す。この結果から、各酸化時間について、酸化量の増加が認められた。また、実験中の電位計の表示電位を図 3.3.10 に示す。高周波電源を用いているため、表示値は電極の電位そのものを意味しないが、その相対値を見る事で変化の観察が可能である。この図から、プラズマの点灯面積が縮小するにつれて電極電位が上昇している事が分かる。この電位上昇によってプラズマ中の反応種密度およびその領域における試料温度が上昇し、40 min および 60 min 酸化領域での酸化速度が増加したものと考えられる。一方、20 min 酸化領域酸化時のプラズマ点灯面積は全面均一酸化時と同一である。そのため、電極電位以外の要因によっても酸化膜厚が増加したと考えられる。



(a) 2 次元的分布



(b) 各電極における酸化膜厚

図 3.3.8 電力一定のまま 3 つの領域で異なる時間酸化した場合の酸化膜厚分布

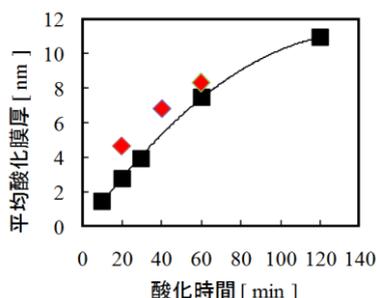


図 3.3.9 各領域の平均酸化膜厚と
全面均一酸化時の平均膜厚との比較

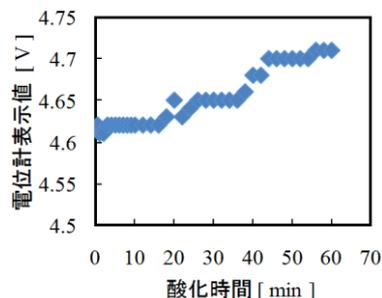


図 3.3.10 実験中の電極電位の相対変化

原因として、試料温度の上昇によるプラズマ消灯後の酸化膜成長が考えられる。本装置においては試料台に熱的制御を行う機構を取り入れていないため、近傍にプラズマ点灯領域があると消灯後も試料の温度が上昇すると考えられ、それにより、消灯後の酸化膜の成長が継続した可能性がある。しかしながら、プラズマ照射による積極的酸化を行っていない領域においては、1 nm 程度の自然酸化膜しか形成されていない。即ち、プラズマによる酸化が行われた領域のみにおいて、酸化膜の成長促進が生じている。このため、プラズマ中で発生した反応種がプラズマ消滅後も酸化膜中に残留しており、その後の昇温によって酸化膜/Si 薄膜層界面へと到達し、酸化が継続したのではないかと考えられる。

3.3.5 投入電力制御による酸化速度増加の抑制

プラズマ点灯領域の減少に伴う電極電位増加による酸化膜成長速度の増大を防ぐ為、プラズマ発生面積に応じて投入電力を減少させ、電極電位を一定に保つ方法を検討した。表 3.3.5 にその実験条件を示す。プラズマ点灯中に投入電力を調整する他は先の実験と同様である。図 3.3.11 に実験中の電位計表示値の変化を示す。

表 3.3.5 投入電力制御の検討を行った際の実験条件

投入電力	開始時 300 W、以降随時調整
プロセスガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
酸化時間	20、40、60 min

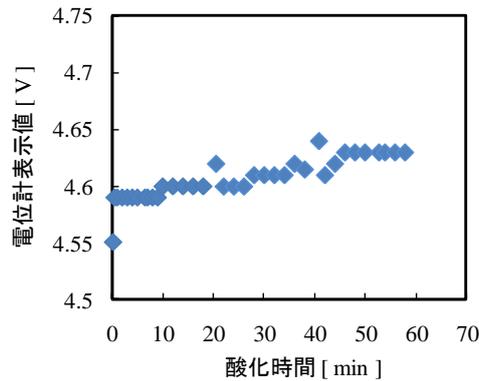
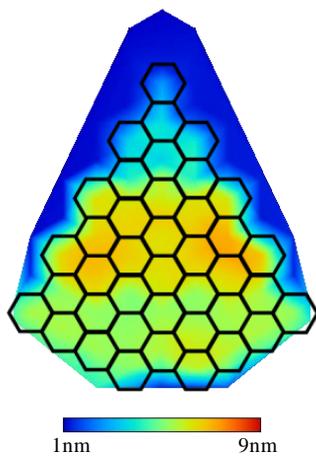


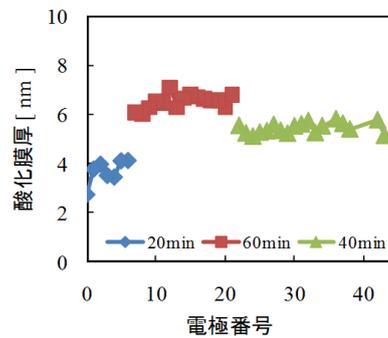
図 3.3.11 実験中の電極電位変化 (電位計表示値)

図 3.3.10 と比較して、電極の上昇による電位変化が抑制されている事が分かる。20 min および 40 min において表示値の上昇が見られるが、これはプラズマ消灯直後、投入電力を制御する直前の値を記録したためである。図 3.3.12 に得られた酸化膜厚分布を示す。投入電力の制御を行わなかった場合と比較して、各酸化領域で酸化膜厚が減少している事が分かる。図 3.3.11 に示す全面均一酸化時との平均酸化膜厚の比較を見ると、40 min 酸化領域の酸化膜厚がほぼ一致した一方で、20 min 酸化領域ではなおも大きく、60 min 酸化領域ではかえって小さくなっている事が分かる。その原因を以下に考察する。

前項での考察と同様、基板温度に着目する。20 min 酸化領域では、先の実験と同じく、プラズマ消灯後も他の領域においてプラズマが点灯を続けているため、その領域からの熱を受け、消灯後の 40 min の間も酸化が進んでいったと考えられる。この時、投入電力を随時減少させたため温度上昇が少なくなり、電力制御を行わなかった場合に比べて酸化膜厚の増加量が小さくなったと思われる。他方、60 min 酸化領域を見ると、全面均一酸化時と電極電位こそ等しいが、プラズマ点灯領域が小さい。そのため、熱が周囲へと拡散してしまい、全面点灯時と比較して温度が低下したと考えられる。40 min 酸化領域については、投入電力の減少による酸化膜厚減少の効果と消灯後の熱的成長の効果とが作用して打ち消し合い、全面均一酸化時と同様の酸化膜厚となったものと考えられる。



(a) 2 次元的分布



(b) 各電極における酸化膜厚

図 3.3.12 酸化膜厚分布

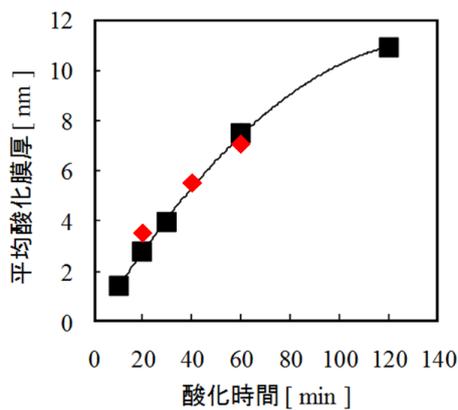
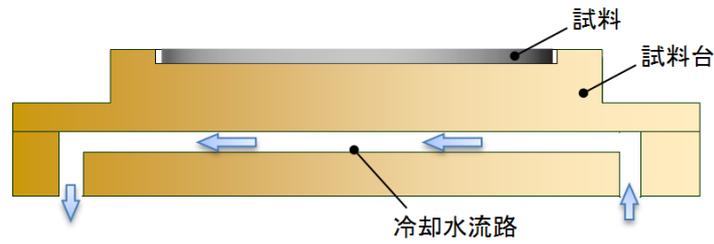


図 3.3.13 全面均一酸化時との平均酸化膜厚比較

3.3.6 試料水冷機構の検討

酸化膜厚の酸化時間依存性の再現性を確実にするためには試料の温度を一定に保つ必要があると考えられる。そこで試料温度を一定に保つためには 2 通りの方法が考えられる。すなわち、試料を昇温する場合と冷却する場合である。前者の場合、ヒーターなどを用いて試料台を加熱することで、試料の温度を一定にすることは可能であるが、例えばカートリッジヒーターを試料台に挿入する場合、簡易に試料の昇温が可能であるが均熱性が問題となることが考えられ、ウエハ加熱用ヒーターなどを用いる場合、均熱性良く昇温できるが、周囲に熱を伝えないようにするため、および均熱性を保つために試料台自体が大きくなってしまい、現状の装置を改良することを考えると困難と考えられる。一方、後者の冷



(a) 概略図



(b) 冷却水の流路



(c) 外観

図 3.3.14 冷却機構

却する場合には、試料台下部に冷却水を流すことで可能となり、比較的簡単に試料台の温度を一定にすることができる。本節では、図 3.3.14 に示す水冷機構を取り付けることにより試料温度を一定に保ち、酸化膜厚の精度向上を目指した結果について述べる。

まず、冷却水による試料台の冷却能について検討した。簡単のため、プラズマを発生させるために投入する電力がすべて温度上昇に使われることとした。試料である Si ウエハ、および試料台を構成しているアルミニウムの熱伝導率はそれぞれ $168 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、 $236 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ と高く、その全体の厚さが 22.6 mm 程度であるため、投入電力を 300 W としても、その表裏における温度差 ΔT_m は 1°C にも満たないことが分かる(式 3.3.1)。

$$\Delta T_m = \frac{\text{物体の厚さ } t \times \text{伝熱量(投入電力)} Q}{\text{熱伝導する面積 } A \times \text{物体の熱伝導率 } \kappa} \quad (3.3.1)$$

冷却水の温度上昇 ΔT は以下の式(3.3.2)により計算できる。

$$\text{伝熱量(投入電力)} Q = \text{冷却水の比熱 } c \times \text{冷却水の流量 } v \times \Delta T \quad (3.3.2)$$

ここで、冷却水の比熱は約 $4.2 \text{ J/g}\cdot^\circ\text{C}$ であり、その流量を 2.5 l/min とすると、投入電力 300 W において、 $\Delta T=1.7^\circ\text{C}$ となる。実際には反応ガスによる空冷、さらには上面への拡散など

の影響も加わる。以上のことより、本水冷機構の冷却能としては十分であるといえる。

表 3.3.6 に示す条件の下、酸化時間を 10 min とした際の酸化膜厚分布を図 3.3.15 に示す。さらに、他の酸化時間についても同様の実験を行い、酸化膜厚の時間依存性を調べた。図 3.3.16 には、それぞれの酸化時間に対する平均の酸化膜厚をプロットしたものを示す。

また、水冷機構の効果を検証するため、図 3.3.17 に示すプラズマの点灯時間分布に従って酸化実験を行い、1 min だけ酸化する領域と 30 min 酸化する領域に分けることで、それぞれの領域において想定される膜厚通りの酸化膜が形成されるかを確認した。プラズマ点灯開始時の投入電力は 500 W とした。投入電力が 500 W となってから 1 分経過した時点で一度投入電力をオフし、30 min 酸化する領域以外の電極をすべて上昇させ、再度プラズマを点灯させ、29 min 酸化させた。これは、電力を 500 W 投入したまま一度に多くの電極を上昇させると反射電力が急激に上昇し、電力を供給している電源が壊れるか、あるいはアーク放電に移行する恐れがあるからである。また、一部電極を上昇させた際は実験開始時と電位の値を等しくするため、投入電力を 238 W とした。さらに、各々の電極に通した光ファイバーによりプラズマの点灯確認を行い、所定の位置のプラズマが点灯、あるいは消灯していることを確認した。

実験条件を表 3.3.7 に、得られた酸化膜厚分布を図 3.3.18 に示す。

表 3.3.6 酸化実験の際の実験条件

反応ガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
誘電体材質	合成石英
電極-誘電体板間距離(下降時)	0.3 mm
誘電体厚さ	1.1 mm
ページ流量	500 ml/min
ページ時間	200 min
投入電力(全電極点灯時)	500 W
プラズマ点灯時流量	500 ml/min
膜厚測定場所(スポットサイズ: 2×5 [mm ²]程度)	電極直下 (14 mm 間隔)

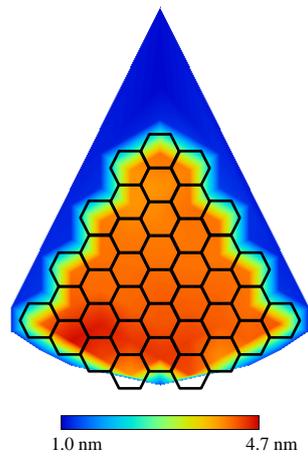


図 3.3.15 10 min 全面酸化における酸化膜厚分布

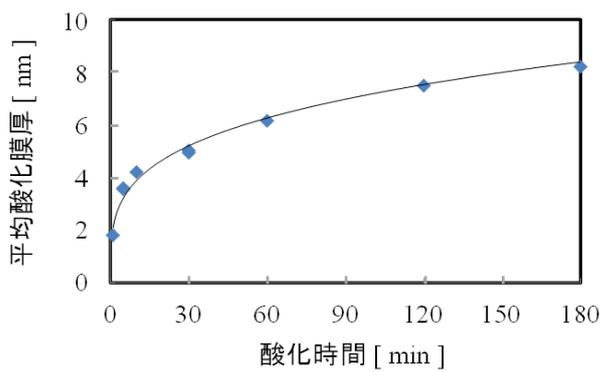


図 3.3.16 試料台を水冷した状態における酸化膜厚時間依存性

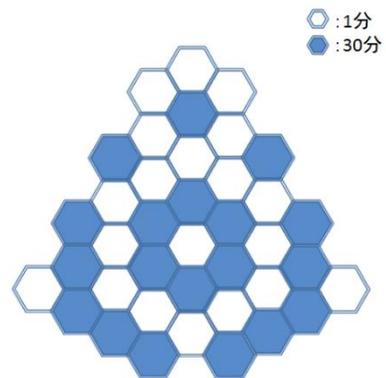


図 3.3.17 プラズマ点灯時間

表 3.3.7 冷却機構の効果検証実験の実験条件

投入電力	500 → 238 W
プロセスガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
酸化時間	30 min
プラズマ点灯電極数	39 → 18 個

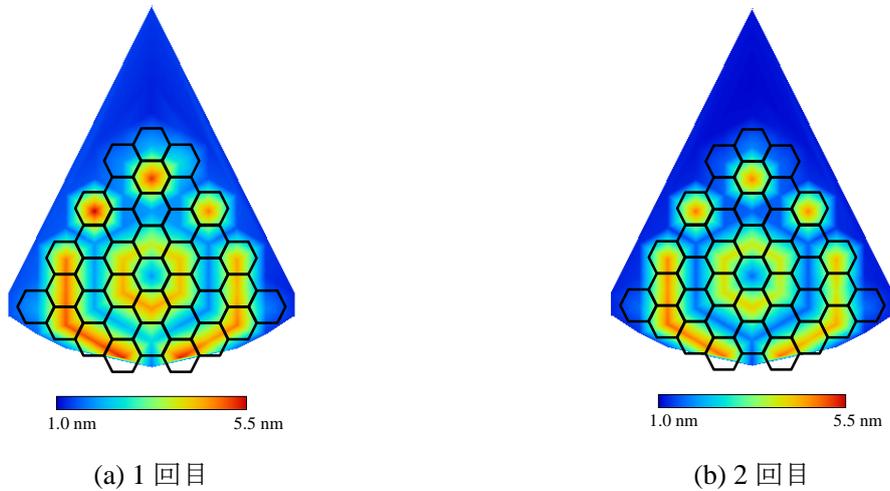


図 3.3.18 実験後の酸化膜厚分布

プラズマにより発生した熱でプラズマが消灯した後も受動的な酸化が進んでいないかどうか検証するため、1 min 酸化した箇所と 30 min 酸化した箇所の酸化膜厚の平均を算出した。この値と、酸化膜厚の酸化時間依存性で検証した 1 min と 30 min の酸化膜厚を比較した。比較結果を表 3.3.8 に示す。1 min 酸化の領域は全電極酸化時とかなり近い値をとっている。この結果から、1 min 酸化後、プラズマを消灯させ他の領域を酸化させていても熱による受動的な酸化は起きていないことが明らかとなり、冷却機構の効果が証明されたといえる。30 min 酸化においては少々の誤差が見て取れるが、これは電力を下げすぎたことによるものであると考えられる。

表 3.3.8 各領域の酸化膜厚分布の比較

酸化時間	1 min	30 min
全電極酸化時	1.80 nm	5.00 nm
実験結果の平均値 (1 回目)	1.96 nm	4.73 nm
実験結果の平均値 (2 回目)	1.60 nm	4.41 nm
1 回目と 2 回目の平均	1.78 nm	4.57 nm

3.3.7 酸化膜厚に対する Si の加工量割合

数値制御による Si 薄膜層膜厚均一化加工を行うにあたり、形成した酸化膜の膜厚に対して Si 薄膜層の除去量の割合を把握することは非常に重要である。SOI ウエハに対して酸化を行い、加工前後の Si 薄膜層厚さの減少量と酸化膜厚とを比較する事によって、Si 薄膜層

の加工量割合を求めた。Si の加工量割合は以下の式 3.3.3 より算出した。

$$(\text{加工量割合}) = \frac{(\text{酸化前SOI層膜厚}) - (\text{酸化後SOI層膜厚})}{(\text{酸化膜厚})} \times 100 \quad (3.3.3)$$

図 3.3.19 に各領域の酸化時間を、表 3.3.9 に実験条件を示す。4 つの領域に分け、それぞれの酸化時間を 1 min、5 min、30 min、120 min とした。初期投入電力は 500 W とした。そして、実験前の Si 薄膜層の膜厚と実験後の酸化膜厚と Si 薄膜層の膜厚を、各電極の直下で測定した。

横軸を酸化膜厚、縦軸を Si 加工量割合としたグラフを図 3.3.20 に示す。若干のばらつきは見られるものの、Si 加工量割合はおおむね 40~50 % となっている。60 % を超えてしまっている三つの測定データは除外し、平均を算出すると 45.1 % となった。この後の実験では Si 加工量割合を 45.1 % として各電極のプラズマ点灯時間を算出していくこととする。

表 3.3.9 Si の加工量割合調査での実験条件

初期投入電力	500 W
プロセスガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
電極—試料間ギャップ	500 μm
最大酸化時間	120 min
プラズマ点灯電極数	39 個
Si 薄膜層厚	約 223 nm

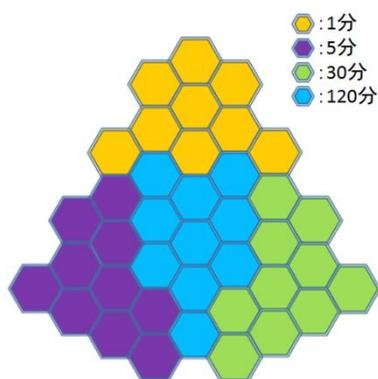


図 3.3.19 酸化時間の分布

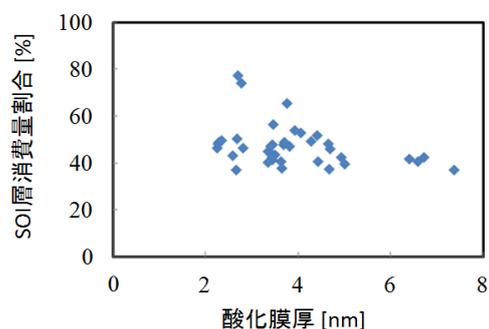


図 3.3.20 酸化膜厚に対する Si 加工量割合

3.4 φ8 インチ SOI ウェハの Si 薄膜層膜厚均一化加工

φ8 インチ SOI ウェハの Si 薄膜層膜厚均一化実験を試みた。大気圧プラズマ犠牲酸化法による Si 層膜厚均一化加工のプロセスを図 3.4.1 に示す。加工前に Si 薄膜層の膜厚分布を測定し各領域の必要加工時間を算出しておき、ヘリウムと酸素の混合ガスで置換し、電極に高周波電力を投入することでプラズマを発生させる。この時生成される酸素ラジカルと Si 薄膜層表面が反応し酸化が進み、所定の膜厚分布の酸化膜を形成した後、フッ化水素酸で洗浄することで酸化膜を除去し、Si 層の膜厚均一化を達成する。

加工を行うにあたり、分光エリプソメトリを用いて加工前の SOI ウェハの Si 薄膜層膜厚を各電極中心で測定した。Si 薄膜層膜厚分布図を図 3.4.2 (a)に示す。この膜厚分布から、目標膜厚との差分を元に各電極における必要加工量を算出した。さらに、この必要加工量を、酸化膜厚に対する実際の Si 消費量の比率で除して必要酸化量を導出した。本実験では、この比率を前節で述べた 45.1%とした。こうして求められた必要酸化量を、前述した酸化膜厚の酸化時間依存性に照らし合わせ、それぞれの電極の酸化時間を決定した。Si 薄膜層が最も薄く加工が必要ない領域も、加工中の自然酸化を防止するためある程度プラズマを発生させ酸化させた。また、今回用いた試料は P-V 値が 4.53 nm と大きかったため、加工は二回に分けて行った。一回目の加工で P-V 値 : 2.54 nm、二回目の加工で P-V 値 : 0 nm となる計算で各電極のプラズマ点灯時間を設定し、実験を行った。

一回目の加工を行った結果を図 3.4.2 (b)に示す。また、加工前と一回目加工後の Si 薄膜層膜厚のばらつきを示すヒストグラムを図 3.4.3 に示す。加工中は電位を一定に保つために、随時投入電力の調整を行った。加工前は P-V 値が 4.53 nm であったものが、加工後は P-V 値 : 2.54 nm となっており、ほぼ予想通りに均一化されたといえる。

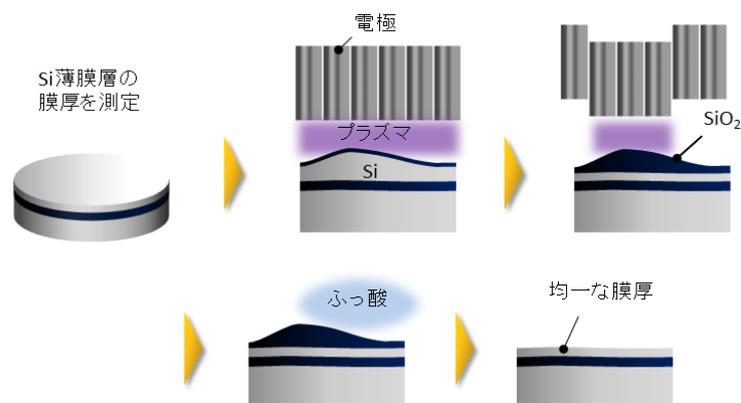


図 3.4.1 多電極全面一括型数値制御加工による Si 層膜厚均一化加工のプロセス

表 3.4.1 数値制御加工(1回目)の実験条件

投入電力	開始時 500 W、以降随時調整
プロセスガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
ガスパーズ時間	200 min
総酸化時間	72 min
使用電極数	39 個
Si 薄膜層厚	約 225 nm

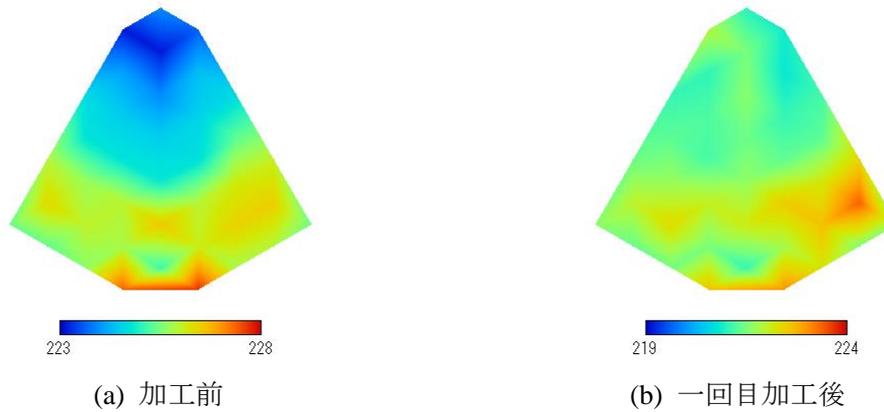


図 3.4.2 加工前後の Si 薄膜層膜厚分布

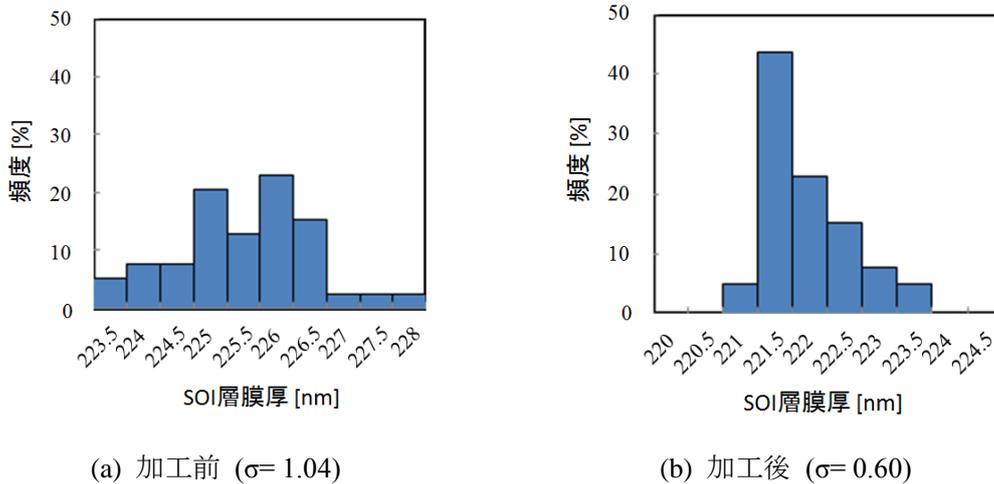


図 3.4.3 加工前後の Si 薄膜層膜厚のヒストグラム

ここで、横軸をプラズマ発生時間、縦軸を実際の酸化膜厚を目標値で除した値としたグラフを図 3.4.4 に示す。ほとんどの点が 100 % 近傍に位置し、全ての測定点で $100 \pm 10\%$ の範囲に収まっていた。このことから、ほぼ理想の膜厚の酸化膜を形成できていることが分かる。次に、予想の Si 薄膜層除去量に対して実際にどの程度除去できているかを示すグラフ

を図 3.4.5 に示す。全体的に 100 % を超えており、最大で目標に対して 4 割以上も Si 薄膜層を除去してしまっている領域があることが分かった。つまり、目標に近い膜厚の酸化膜を形成できているにも関わらず、予想以上に Si 薄膜層を除去してしまっている。原因を解明するため、各電極直下の領域における酸化膜厚に対する Si 薄膜層の除去率を図 3.4.6 のグラフに示す。当初、酸化膜厚に対する Si 薄膜層の除去率は 45.1% として計算していたが、今回の実験の Si 薄膜層除去率の平均は 51.2% であり、予想より 6.1% 高い事が分かった。したがって、二回目の加工では酸化膜厚に対する Si 加工量割合は、一回目の実験で得た値を用い、51.2% とした。また、一回目の実験と同様に実験を行い、Si 薄膜層の膜厚分布と膜厚のばらつきを示すヒストグラムをそれぞれ図 3.4.7、3.4.8 に示す。この二回目の加工で Si 薄膜層の膜厚の P-V 値を 1.56 nm まで改善することができた。また、予想酸化膜厚に対する割合、予想 Si 薄膜層除去量に対する割合のグラフを図 3.4.9、図 3.4.10、図 3.4.11 にそれぞれ示す。

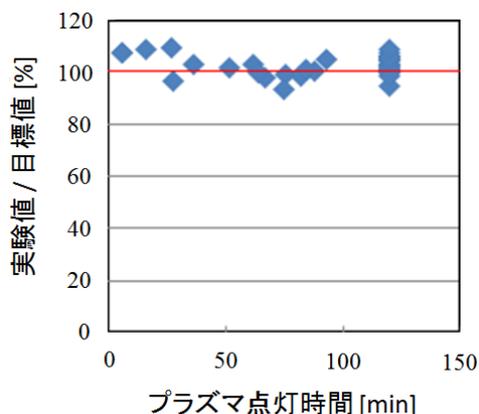


図 3.4.4 予想酸化膜厚に対する割合

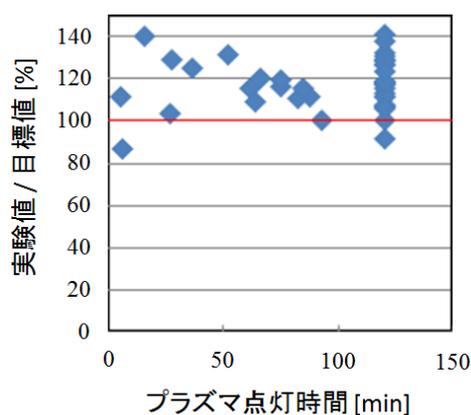


図 3.4.5 予想 Si 層加工量に対する割合

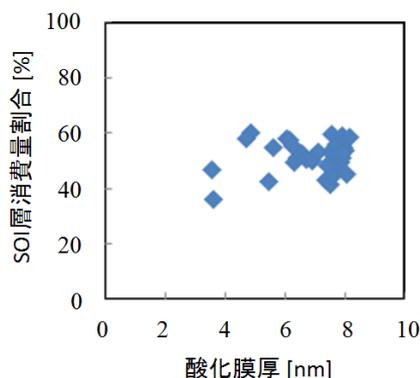


図 3.4.6 酸化膜厚に対する Si 層加工量割合

表 3.4.2 数値制御加工(2回目)の実験条件

投入電力	開始時 500 W、以降随時調整
プロセスガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
ガスパージ時間	200 min
総酸化時間	142 min
使用電極数	39 個
Si 薄膜層厚	約 220 nm

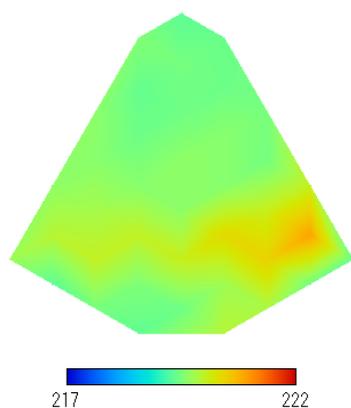


図 3.4.7 加工後の Si 薄膜層膜厚分布

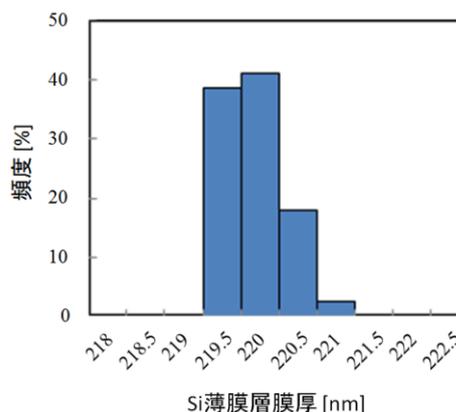


図 3.4.8 二回目加工後の Si 薄膜層膜厚ヒストグラム ($\sigma=0.34$)

予想酸化膜厚に対する割合のグラフを見ると、プラズマ点灯時間が短い所では 100%に近いが、プラズマ点灯時間が長くなるほど割合が下がっていき目標の酸化膜厚に対して十分に酸化できていないことが分かる。このグラフから、予想酸化膜厚に対する割合が下がっていくのは電極を 16 個以上上昇させたあたりからである。一回目の実験では電極を 16 個までしか上昇させず加工を終えたため、電極を 17 個以上上昇させた時の予想酸化膜厚に対する割合の傾向を見る事が出来なかった。この二回目の実験の結果から、電極を 1 つずつ上昇させていく過程の中である時点で酸化が進む速度が低下し十分に酸化できなかったということが考えられる。原因として、電位の値を一貫して一定に保つため電力を徐々に下げていったが、実験中に電力を下げてても電位の値が変わらない場合もあり、投入電力が不足した状態になってしまった可能性がある。

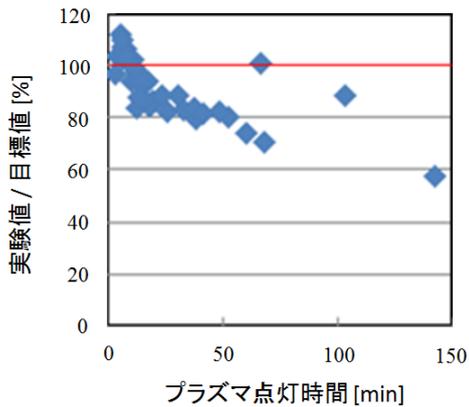


図 3.4.9 予想酸化膜厚に対する割合

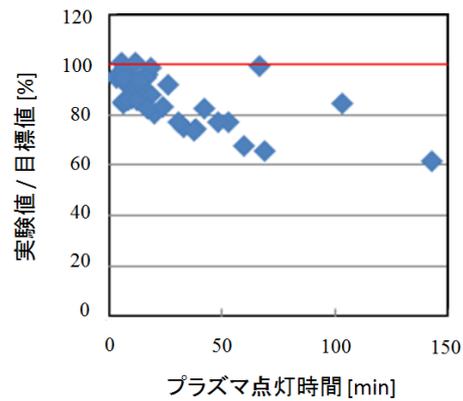


図 3.4.10 予想 Si 層加工量に対する割合

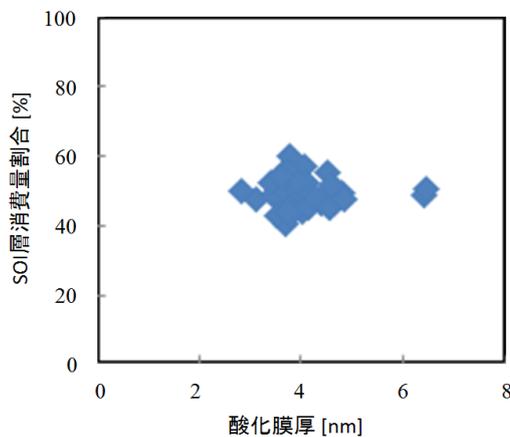


図 3.4.11 酸化膜厚に対する Si 層加工量割合

二回目の実験での酸化膜厚に対する Si 薄膜層除去率を図 3.4.11 に示す。除去率の平均は 48.7%であった。想定した除去率は 51.2%であり、多少の差はあったものの一回目の実験での差ほど大きくはなかった。これより、除去率は 50%前後が妥当であると思われる。

以上のことから、二回目の実験では加工の途中から酸化速度が低下し実際に形成した酸化膜の膜厚が目標に達しなかったため十分に P-V 値を改善することが出来なかったといえる。

一回目と二回目の実験を踏まえ、三回目の均一化加工の実験を行った。これまでの実験で、Si 薄膜層除去率がそれぞれ 51.2%と 48.7%となったため、その平均を取り三回目の実験では電極のプラズマ点灯時間を計算する際に、酸化膜厚に対する Si 薄膜層除去率を 50.0%として算出した。それ以外の実験条件は一回目、二回目と全く同様である。三回目の加工実験を行った結果、P-V 値を 1.14 nm まで改善することに成功した。図 3.4.12 に三回目加工後の Si 薄膜層膜厚分布を示す。また、図 3.4.13 に膜厚のヒストグラムを示す。前回の実験で、投入電力を調整する際に電力を下げ過ぎていた恐れがあったため、電位の値と合わせ

て光ファイバーを介して見ることができるプラズマの光の強さも投入電力を調整する際の参考にした。プラズマを発生させている電極が少なくなるにつれ、プラズマが点灯すべき電極で確実にプラズマは点灯しているか注意深く観察した。今回の実験では実験途中でプラズマが点灯すべき領域が消灯しているということはなく、精度良く Si 薄膜層の膜厚を均一化することに成功した。

表 3.4.3 数値制御加工(3回目)の実験条件

投入電力	開始時 500 W、以降随時調整
プロセスガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
ガスパーズ時間	200 min
総酸化時間	142 min
使用電極数	39 個
Si 薄膜層厚	約 217 nm

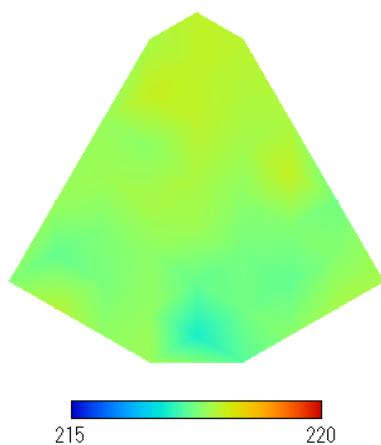


図 3.4.12 三回目加工後の SOI 層膜厚分布

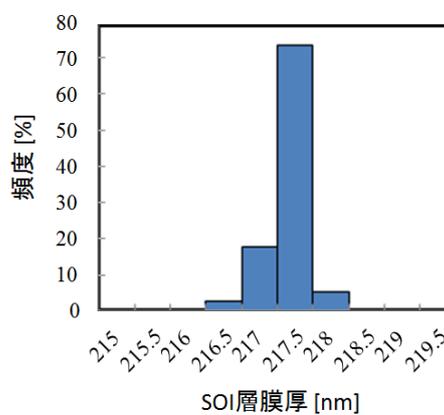


図 3.4.13 三回目加工後の SOI 層膜厚ヒストグラム ($\sigma=0.23$)

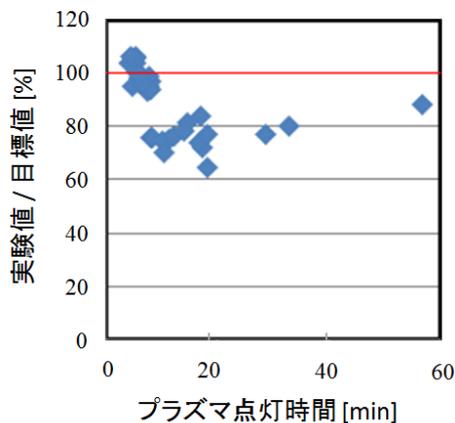


図 3.4.14 予想酸化膜厚に対する割合

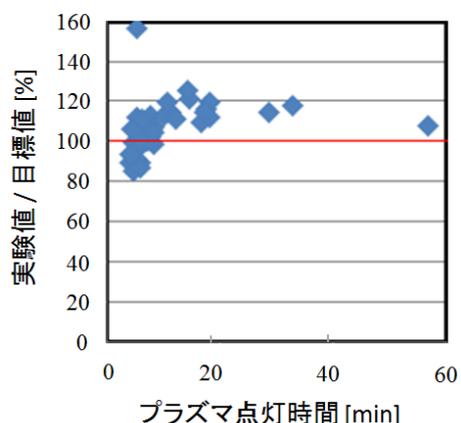


図 3.4.15 予想 Si 層加工量に対する割合

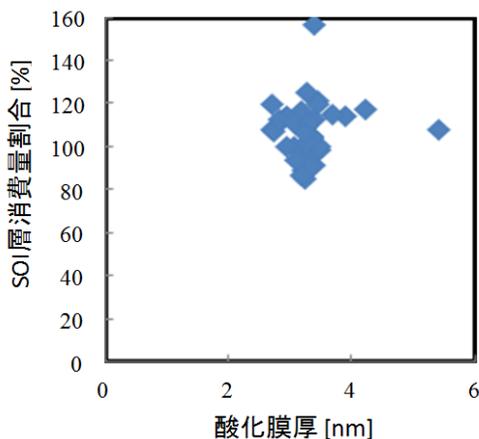


図 3.4.16 酸化膜厚に対する Si 層加工量割合

予想酸化膜厚に対する割合(図 3.4.14)を見ると、まだ多くの電極でプラズマを発生させていた約 10 分以内では概ね 100 %に近い値を示しているが、プラズマを消灯するため上昇させた電極が 18 個を超えた時点で押し並べて割合が低くなる結果となった。この傾向は二回目の実験と全く同じであり再現性が確認できた。酸化膜厚が目標より薄い領域が多数存在するため予想 Si 薄膜層除去量に対する割合は当然低くなるであろうと考えた。しかし、図 3.4.15 を見るとむしろ予想より Si 薄膜層が多く除去されていることが分かった。酸化膜厚に対する Si 薄膜層除去率のグラフ(図 3.4.16)よりプラズマ点灯時間が長い領域で算出した Si 層加工量割合は、想定していた 50.0%よりも全体的に 20%以上高い値となっていることが判明した。目標よりも酸化膜が薄かったにもかかわらず Si 薄膜層除去率が高くなったことで、結果として実際に除去した Si 薄膜層が予想していた Si 薄膜層の除去量を超えてしまったものと考えられることができる。

三回に亘る均一化加工実験を通して、Si 薄膜層膜厚のばらつきが P-V 値 : 4.53 nm であったものを P-V 値 : 1.14 nm まで改善することに成功した。しかしながら、本装置の問題点が三つ顕在化した。一つ目は加工中に電極を上昇させていきプラズマを点灯している電極数が少ない状態になると、何らかの理由で計算した時間通りプラズマを照射して酸化しても目標より酸化膜厚が薄くなってしまうこと、二つ目は三回目の実験で見られた Si 薄膜層除去率が各領域で大きく異なること、そして三つ目は実験中に電位を正確に測定することが困難であったため、電力の調整が大雑把なものとなったことである。

3.5 膜厚均一化加工後の Si 薄膜層膜厚分布詳細測定

前節で述べた Si 薄膜層膜厚の P-V 値はウエハの 6 分の 1 領域に設置された電極の中心部で測定した膜厚に対するものであった。膜厚均一化加工後の Si 薄膜層の膜厚分布およびその P-V 値をより詳細に評価するため、x 座標 = 0 の直線上を 1 mm 間隔で測定を行った結果を図 3.5.1 に示す。同図における青線は隣接する電極の境界部であり、黄色の領域は電極直下の部分となっている。この結果から、電極境界部において Si 薄膜層の実際の除去量が多くなっており、目標とする除去量とはずれが生じているということが分かる。このような電極境界部での除去量の増加による膜厚のずれは、その周囲と比較した時に最大 1 nm 程度である。これは電極端部における電界集中のためではないかと考えているが、この現象が Si 薄膜層膜厚均一化加工の精度に与える影響は非常に大きいと言わざるを得ず、実用装置の開発に向け早急に解決すべき課題であると言える。

また、膜厚均一化加工を行った $\phi 8$ インチ SOI ウエハ全体の膜厚分布を、反射分光法を用いて測定した結果を図 3.5.2 に示す。この図においても対辺間 14 mm の電極の形状が見られることから、電極境界部では電極直下の領域と比較して、除去量に変化していることがわかる。また、単一の電極直下でも微細な丸い形状が見られるため、この部分でも Si 薄膜層の膜厚分布にばらつきが生じていると考えられる。この現象の原因としては、ウエハ上や誘電体板などのコンタミネーションの影響の可能性が考えられ、今後、詳細な検討が必要と考えられる。

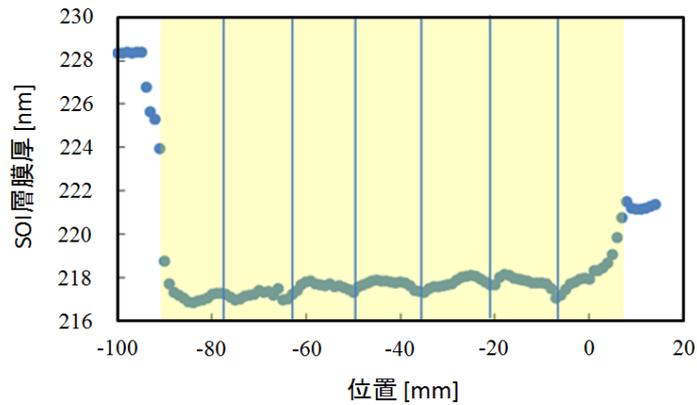


図 3.5.1 $x = 0$ での膜厚分布の詳細測定

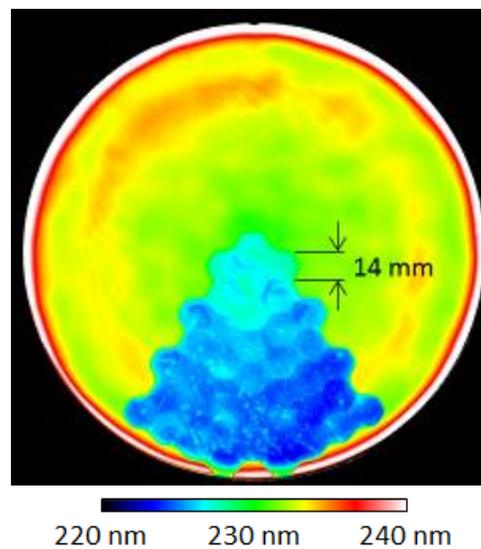


図 3.5.2 加工後の Si 薄膜層膜厚分布詳細測定

3.6 結言

本章では、個々の電極の電極試料間ギャップを制御する方式の多電極プラズマ発生装置を設計製作し、その基本特性を把握するための実験結果および、SOI ウエハを用いた Si 薄膜層の厚さ均一化実験の結果について述べた。以下に本章で得られた結果をまとめる。

- 1) 市販の 300mm SOI ウエハを用いて Si 層膜厚均一加工を行うと仮定した際の、電極サイズと加工後の Si 層膜厚均一性との関係を計算機シミュレーションによって明らかにした。

- 2) 電極形状を対辺間距離 14 mm の六角形とし、 $\phi 8$ インチウエハの 1/6 の領域を加工領域とした 54 個の電極を有する電極試料間ギャップ制御型の多電極型大気圧プラズマ発生装置を設計・試作した。
- 3) 試作した装置を用いて、Si ウエハを加工対象物として大気圧プラズマ酸化実験を行った。コイルに通電しない状態において全電極－試料間にプラズマが発生し均一な酸化膜が形成されること、任意のパターンで各電極－試料間のプラズマの発生・消滅を制御でき、そのパターンに対応した酸化膜が形成されること、を確認した。
- 4) 形成される酸化膜の膜厚の酸化時間依存性、酸化膜厚に対する Si の消費割合といった酸化特性を調査し、数値制御酸化実験の基礎データを得た。
- 5) $\phi 8$ インチ SOI ウエハの 1/6 の領域において、Si 層膜厚均一化加工実験を行った。加工前に 4.53 nm であった厚さのばらつきを、加工後に 1.14 nm にまで改善することに成功し、電極試料間ギャップ制御型の多電極全面一括型数値制御加工が実現可能であることを実証した。

以上のように、電極上部に取り付けたソレノイドコイルの磁力の制御によって電極を任意に上下させ電極試料間の電界距離を制御することで、プラズマの点灯時間をコントロールし精密な数値制御加工を実現することができた。全面一括型のコンセプトでは加工の空間分解能は電極の大きさに依存するため、高空間分解能化のためには電極のサイズを小さくする必要がある。しかし、ギャップ制御型ではアクチュエータの大きさよりも電極を小さくできない。また、アクチュエータをプラズマ発生雰囲気と空間的に隔絶するため誘電体板などを電極直下に配置する必要がある。しかし、電極上下動のストロークを長くすれば大電力を投入してもプラズマの ON-OFF 制御が可能であるため、高い加工速度を得ることができると期待される。そのため、ギャップ制御型の手法は、高速な形状修正加工が求められる分野への応用が適していると考えられる。

第 4 章 電圧制御型多電極大気圧プラズマ発生装置 の基礎検討

4.1 緒言

本章では電極に印加する電圧を ON-OFF 制御することで全面一括型数値制御加工を行う、電圧制御型多電極大気圧プラズマ発生装置の設計について検討する。大気圧プラズマの ON-OFF 制御は電極試料間の電界強度を制御することによって可能であり、ギャップ制御型では電極試料間の距離を制御したが、本章で詳説するのは電極の電圧を直接 ON-OFF する手法である。電圧制御型装置を設計するにあたり、検討すべき課題が二つ存在する。一つは電極間の最適な距離について、もう一つはプラズマのスイッチング手法である。

本章では、上記の二項目の検討を行い、検討結果に基づいて装置設計を行い、デモンストレーションとして数値制御酸化加工を行った結果について述べる。

4.2 電極間距離に関する検討

電極を固定する場合、個々の電極においてプラズマを独立制御する上で、電極間の距離が問題となる。電極間には電気容量が存在するため、電極どうしが近すぎる場合、OFF 状態の電極に高周波電力が伝わりプラズマが制御不能となる可能性がある。逆に電極どうしが離れすぎている場合、プラズマが生じず加工できない領域が存在する可能性がある。3 章で試作した装置のように電極一つ一つの上部にソレノイドコイルを取り付け、電極を上下動させる機構の場合、仮に隣り合う電極どうしで電力が伝わっても、電極-試料間の電界強度でプラズマを制御しているので問題にならない。しかし、電極を完全に固定する場合、隣り合う電極間で電力が伝わるとスイッチによるプラズマの on-off 制御が不可能となる(図 4.2.1(a))。そのため、電極間の距離を一定値以上離す必要があるが、電極の間隔を空けすぎると、電極の境界部分はプラズマが消滅し連続的に酸化することができない(図 4.2.1(b))。

以上より、電極間で電力が伝わることなく各電極のプラズマを独立的に制御することができ、かつ電極境界部分は電極中心付近と同じ酸化速度で均一に酸化させることが可能な電極間距離を検討する必要がある。本節では、上記の条件を満たす電極間距離を検討するために基礎実験装置を設計・試作し、行った実験の結果について述べる。

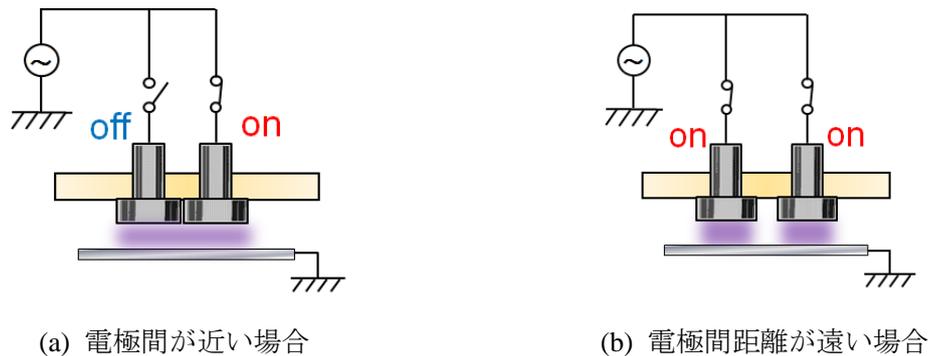


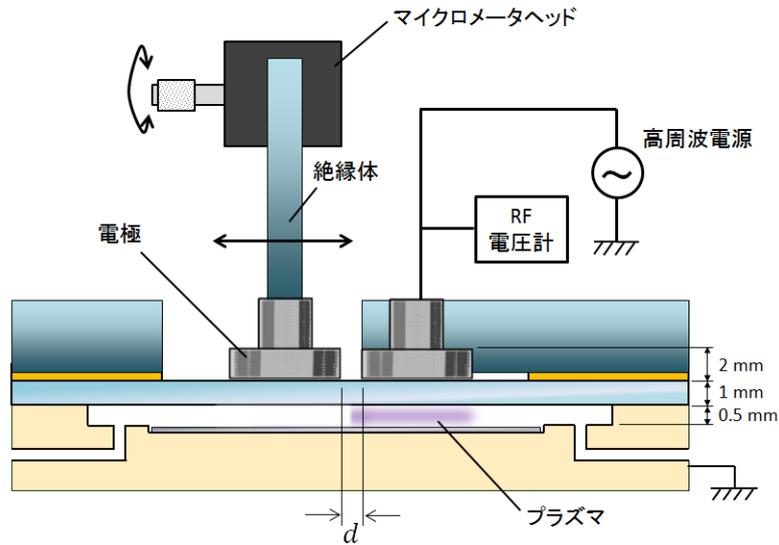
図 4.2.1 電極間距離における問題

4.2.1 電極間距離検討のための基礎実験装置概要

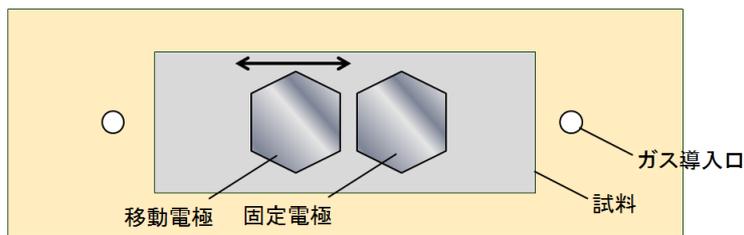
最適な電極間距離を検討するため、電極間の距離が可変な基礎実験装置を作成した。図 4.2.2(a)に装置の概略図を示す。本装置では試料台に 20 mm×45 mm の短冊状の試料を配置するための溝が形成されており、それに対向するように厚さ 1 mm のガラス板を配置している。ガラス板と試料間の距離は 500 μm である。

本装置は 2 個の電極を有しており、右側の電極は絶縁体に固定され底面がガラス板に接しており、13.56 MHz の電源に接続され給電される。もう片方の電極も底面はガラス板との距離はゼロであり、上部にはマイクロメータヘッド付きステージを取り付けており、10 μm 単位で固定電極との距離を変えることができる。電極底面は対辺 14 mm の正六角形であり底面部分の板厚は 2 mm である。この移動電極は固定電極と接していない時は他の導体とは接しておらず、電氣的に浮遊した状態である。電極間での電力の伝達を調べるに当たり、固定電極と移動電極の相対する面どうしの平行度が非常に重要となる。実験を行う前にすきまゲージで電極間距離を測定、テスターにより固定電極-移動電極間の導通を確認、及び電極間にライトで光を当て反対側から見た時に電極間を通ってくる光を見て平行度を調節した。

基礎実験装置を上から見た時の試料と電極の位置関係を図 4.2.2(b)に示す。左に位置している φ3 の穴よりプロセスガスが導入され、右側に位置する同じ直径の穴から大気に出て行く。固定電極の左端が試料のちょうど中心に来ており、その左側の移動電極がステージを動かすことにより左右に動き、固定電極との距離を自由に調節することができる。



(a) 基礎実験装置の概略図



(b) 基礎実験装置を上から見たときの試料と電極の位置

図 4.2.2 基礎実験装置概要

4.2.2 電極電圧に対する必要電極間距離

固定電極に給電された電力が移動電極に伝わり、給電されていない電極下でプラズマが発生することを防ぐために必要な電極間距離を調べた。フッ化水素酸で洗浄し超純水で 10 分間リンスした Si ウエハを試料台に置き、電極間距離をゼロの状態にしておき、プロセスガスで反応室内をパージし、その後給電を開始する。電極同士が接触しているため移動電極にも電力が伝わり、結果として 2 つの電極下でプラズマが発生する。この状態から移動電極上部のステージを動かし、徐々に電極間距離を広げていく。固定電極から移動電極をゆっくり離していき、移動電極下のプラズマが消滅する時の電極間距離を記録した。プラズマが消滅する距離はその都度ばらつきがあるため、実験は 2 回行った。なおプラズマは一回発生させ消滅させた後、もう一度発生させるときは 1 回目に発生させる時よりも低い電力で発生する、つまり一度プラズマが発生した空間はプラズマが発生しやすい雰囲気になっている現象を経験的に把握しており、各実験の合間に必ず 10 分以上ガスをパージすることとした。

表 4.2.1 電極間距離検討の実験条件

投入電力	275、300、325、350、375、400 W
プロセスガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
パーズ時間	30 min
各実験の間のパーズ時間	10 min
ガス流量	0.5 l/min

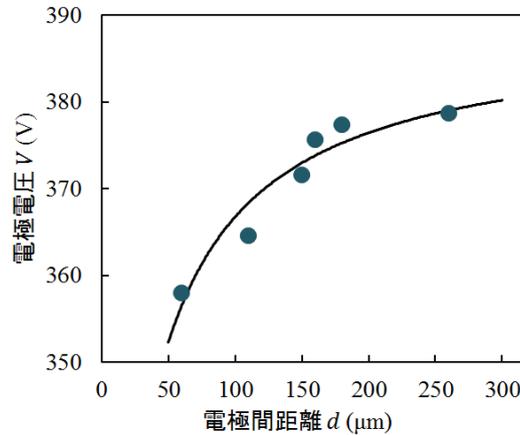


図 4.2.3 電極電圧に対する必要電極間距離

表 4.2.1 に実験条件を示す。移動電極下のプラズマを発生させないために必要な電極間距離は固定電極に掛かる電圧に依存することになる。電力は 275 W から 300 W の間で 25 W 刻みに振り、そのときの電極電圧を測定した。実験結果を図 4.2.3 に示す。

隣接した電極を持つ装置の概略図を Fig.4.2.2(a)に、その等価回路図を Fig.4.2.2(b)に示す。 C_1 は電極間の容量、 C_2 は電極試料間の容量である。電極に掛かる電圧を V 、電極試料間に掛かる電圧を V' とおいている。電極に電圧 V をかけたとき、電極試料間に掛かる電圧 V' は、

$$V' = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot V \quad (4.2.1)$$

と表せる。プラズマ発生のしきい値電圧を V_{th} とすると、 V' が以下の条件を満たせば ON/OFF の制御が可能となる。

$$V_{\text{th}} \geq V' = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot V \quad (4.2.2)$$

書き換えると以下のようなになる。

$$\frac{V}{V_{th}} \leq \frac{C_2}{C_1} + 1 \quad (4.2.3)$$

これはつまり、 C_2 に比べ C_1 が小さいほど V/V_{th} 比を大きく取れる、すなわちより大きな V でも ON-OFF制御が可能となることを意味している。隣接する電極間の対向する面の面積を S 、電極間距離を d 、誘電率を ϵ 、装置系全体がもつ浮遊容量を A とおくと

$$C_1 = \frac{\epsilon S}{d} + A \quad (4.2.4)$$

結局、式(4.2.3)は以下のようになる。

$$\frac{V}{V_{th}} \leq \frac{C_2}{\frac{\epsilon S}{d} + A} + 1 \quad (4.2.5)$$

実際に必要な電圧 V に対し、 V/V_{th} がこの式を満たすように d をある値以上に決定する必要がある。式(4.2.5)において V_{th} と A が分かれば、 d を決定することができる。ここで $C_2 = 2.1$ pF であることから、式(4.2.5)は下記のように書き換えられる。

$$\frac{V - V_{th}}{V_{th}} = \frac{2.1}{\frac{0.143}{d} + A} \quad (4.2.6)$$

図(4.2.4)の結果をもとに、式(4.2.6)を V_{th} と A をパラメータとしてフィッティングした結果、 V_{th} と A が以下のように求まる。

$$V_{th} = 284.9 \text{ (V)}, \quad A = 5.55 \text{ (pF)} \quad (4.2.7)$$

図 4.2.3 には式(4.2.7)の値を用いた近似曲線を示している。

多電極型装置においては一つの電極は多くの電極に囲まれるので、周囲に n 個の電極が存在するとき、 C_1 は以下ようになる。

$$C_1 = n \frac{\epsilon S}{d} + A \quad (4.2.8)$$

式(4.2.5) に代入すると、

$$d \geq \frac{n\epsilon S(V - V_{th})}{C_2 V_{th} - nA(V - V_{th})} \quad (4.2.9)$$

となり、多電極型装置を設計する上で満たさなければならない電極間距離 d の条件が求められた。本研究では通常の実験時に電圧が 370 V を超えることはないため、電極間距離を 300 μm と設定すれば、確実に電極を独立制御可能であると結論づけた。

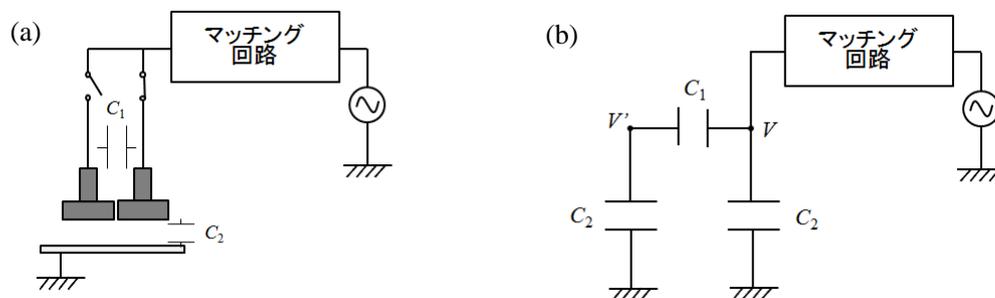


図 4.2.4 (a) 一方が OFF 状態、もう一方が ON 状態の二電極装置概略図、(b) 隣りあう二つの電極をもつ装置の等価回路図

4.2.3 電極境界部の酸化膜厚分布

電極境界部に形成される酸化膜厚分布を詳細に検討した。実験装置は前節で述べた移動電極の基礎実験装置を用いて電極間距離を 100 μm 、200 μm 、300 μm とし、プラズマを発生させ酸化を行った。酸化膜厚分布は分光エリプソメトリを用いて測定した。実験条件を表 4.2.2 に、図 4.2.5 に分光エリプソメトリを用いて測定した酸化膜厚分布を示す。

図 4.2.5 で背景がオレンジ色の部分が電極直下の領域であり、中心のオレンジ色の直線は電極境界部分を示している。再現性を確かめるため、実験は各条件において 2 回ずつ行った。測定は図 4.2.5(d) に示すように、固定電極と移動電極の中心を通るように一直線に 1 mm ピッチで測定を行った。このグラフを見ると、電極直下の領域は全体にわたって概ね均一に酸化されていることが分かる。図 4.2.6 には、測定方向は同じとし 50 μm ピッチで電極境界部付近の 2 mm の範囲の酸化膜厚を測定した結果を示している。この結果から、位置に関わらず連続的に酸化されていることが分かり、電極境界部において酸化反応が進んでいない領域は見られない。このことから電極間距離を 300 μm としても加工には問題ないことが明らかとなった。

表 4.2.2 実験条件

投入電力	300 W
プロセスガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
パージ時間	30 min
各実験の間のパージ時間	10 min
ガス流量	0.5 L/min
電極間距離	100, 200, 300 μm

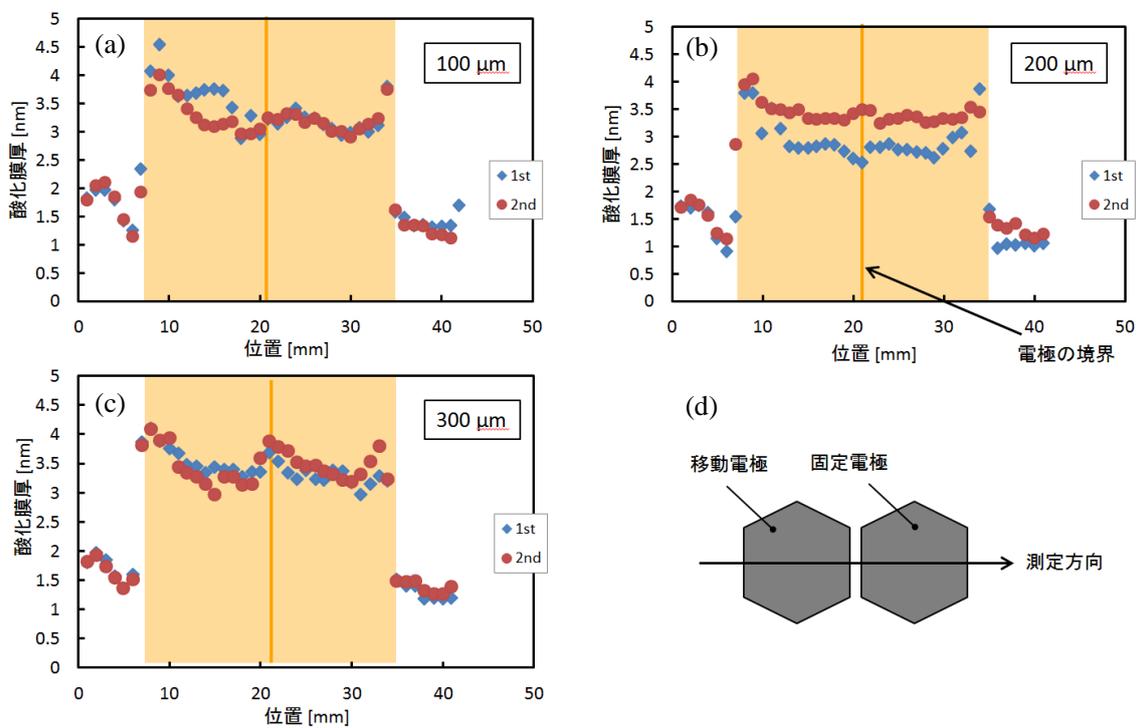


図 4.2.5 電極間距離を変えた時の酸化膜厚分布(測定間隔 : 1 mm) 電極間距離 : (a) 100 μm, (b) 200 μm, (c) 300 μm, (d) 移動電極と固定電極の位置関係と測定方向

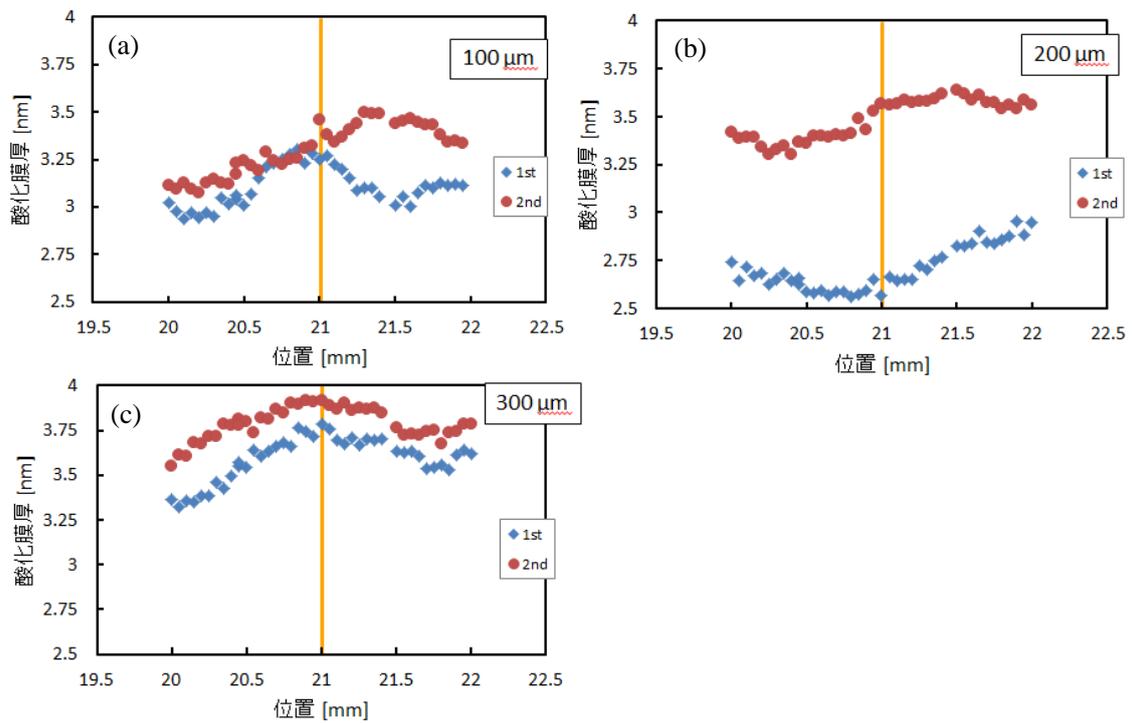


図 4.2.6 電極境界部の酸化膜厚分布の詳細測定(測定間隔 : 50 μm) 電極間距離 : (a) 100 μm , (b) 200 μm , (c) 300 μm

4.3 7 電極を有する多電極装置を用いた実験

4.3.1 7 電極装置概要

図 4.3.1 に示すような 7 つの電極を持つ装置を作成した。電極-試料間のギャップは、スペーサを導入することで任意の距離に変えることができる機構となっている。

本節では、まず電極-試料間のギャップと投入電力が形成される酸化膜形状に与える影響を評価し、酸化膜の再現性、酸化膜厚の酸化時間依存性、電極端部の形状による影響について調査した。

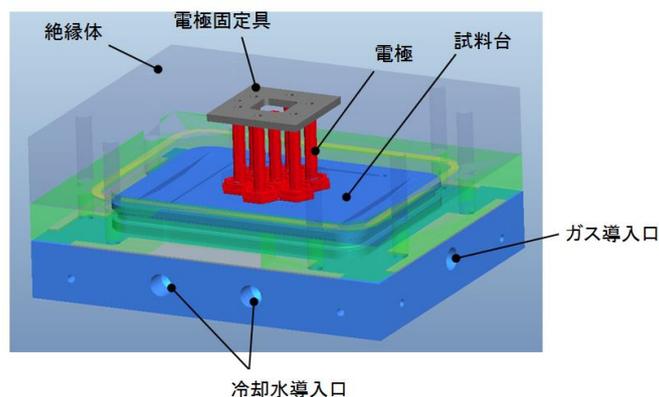


図 4.3.1 7 電極装置構成図

4.3.2 実験条件の最適化

本装置でウエハ表面の酸化を行う際の実験条件のパラメータとして、(i)電極－試料間ギャップ、(ii)ガス流量、(iii)投入電力、(iv)酸化時間が挙げられる。これらのうち、酸化時間は膜厚制御のためのパラメータであるので、電極－試料間ギャップ、ガス流量、投入電力を変化させ最適な実験条件を検討した。

(i)電極－試料間ギャップ

電極－試料間ギャップの距離を変えた際の実験条件を表 4.3.1 に、酸化後の Si ウエハ表面の集光灯による観察結果を図 4.3.2 に示す。酸化実験には中央以外の六つの電極を用いて行った。

表 4.3.1 最適なギャップ調査の実験条件

投入電力	110 W
プロセスガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
ガス流量	0.2 L/min
電極－試料間ギャップ	200、 500 μm、 1 mm
酸化時間	5 min

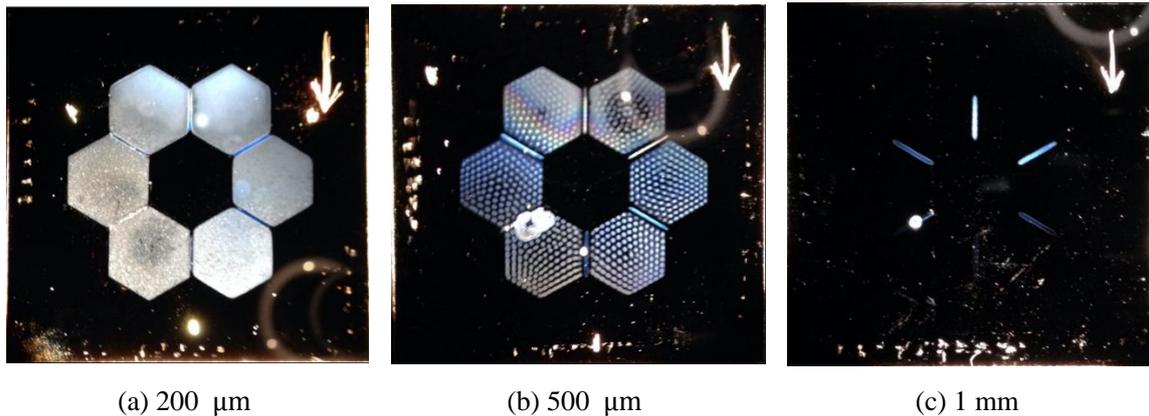
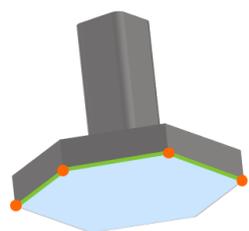


図 4.3.2 酸化後の Si ウエハ表面の集光灯観察結果

図 4.3.2(a)では、ギャップ 200 μm の場合は 6 電極全領域に散乱光の強度の増加が見られ、全面が均一に酸化されていると考えられる。ギャップ 500 μm の場合(図 4.3.2(b))はウエハ表面に多数の丸い模様が見られ、各電極の間で電界集中により酸化膜厚が非常に厚くなっていると思われる部分がある。このような酸化膜が得られることは、膜厚均一化に大きな悪影響を与えるため避けるべきである。一方、ギャップ 1 mm の場合(図 4.3.2(c))では電極の境界部分においてのみ散乱光の増加が確認されており、ウエハ全面の膜厚均一化という点で適していない。この結果から、電極-試料間ギャップは 200 μm が最適とした。一般的に大気圧下でプラズマを発生させる場合、そのギャップは 200~300 μm である場合が多く、500 μm や 1 mm では電極-試料間の電界強度が弱まり、発生するプラズマが不安定になる、もしくは電極直下の領域の中でもプラズマの発生しやすい部分に集中が起こり、均一なプラズマを発生させることが困難となる可能性が考えられる。

電極-試料間の電界強度は、電極-試料間の印加電圧による電界と電極形状による電界集中の 2つの項が影響していると考えられる。ギャップが 200 μm と狭い場合、電極形状による電界集中の影響よりも印加電圧による電界が大きく影響することで、全面で均一にプラズマが発生し全面が酸化され、ギャップが 1 mm と広い場合は逆に電極形状による電界集中が大きく影響することで、プラズマに偏りが生じ境界部のみが酸化されたのではないかと考えられる。また、図 4.3.2(b)のような模様が見られる原因としては、微小放電による電荷の移動が電極境界部や電極端部で発生し、その領域の電界強度が弱まることで、未放電の領域で新たな微小放電が繰り返し起こり等間隔に模様が形成されているのではないかと考察している。微小放電が形成される順、つまり、微小放電の形成されやすい順というのは電界集中、つまり電極形状の曲率に依存するため、図 4.3.3 のようになっていると考えられ、結果、等間隔の模様が形成されたと考察している。



微小放電の発生順序

- 1 : 電極の角部分
- 2 : 電極の辺部分
- 3 : 電極の面部分

図 4.3.3 微小放電の発生順序

(ii)ガス流量

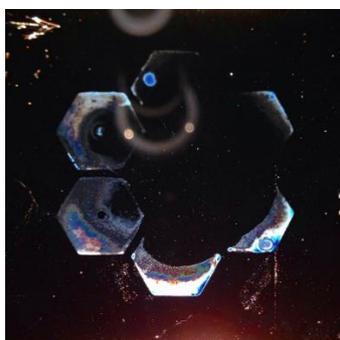
本装置ではガス流量は 0.2 L/min~2.0 L/min まで制御可能である。ガス流量を上げるにつれてプラズマの状態が不安定となることが経験的に分かっており、ガス流量を 2.0 L/min とした際には上流側に位置する電極のプラズマが消滅した。全ての電極で安定にプラズマを生成するには、プロセスガスはなるべく穏やかに供給することが望ましいと考え、ガス流量は本装置の最小流量である 0.2 l/min を用いることとした。

(iii)投入電力

投入電力を変化させた際の実験条件を表 5.2 に、酸化後の Si ウェハ表面の集光灯による観察結果を図 4.3.4 に示す。

表 4.3.2 最適な投入電力調査における実験条件

投入電力	30、 60、 110 W
プロセスガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
ガス流量	0.2 l/min
電極-試料間ギャップ	200 μm
酸化時間	5 min



(a) 30 W



(b) 60 W



(c) 110 W

図 4.3.4 酸化後の Si ウェハ表面の集光灯観察結果

図 4.3.4(a)、(b)の 30 W および 60 W では 6 電極のうちプラズマが発生していない部分があることが分かるが、これは 6 電極領域全面でプラズマを発生させるには、投入電力が不足していたと考えられる。110 W においては、図 4.3.4(c)のように 6 電極全面で一様に散乱光強度の増加が見られた。よって、電力は最低でも 110 W 投入するのが良いと考えた。

以上より、電極－試料間ギャップ 200 μm 、ガス流量 0.2 l/min、投入電力 110 W 以上を標準的な実験条件として用いることとした。

4.3.3 酸化膜の再現性

表 4.3.3 に示す条件で 2 回酸化実験を行った結果を図 4.3.5 に示す。この実験においても電力を投入したのは中央の電極を除く周囲の電極のみであり、中央の電極直下の領域が酸化されないことを確認しながら行った。青の領域はプラズマを発生させた領域であり、黄色の領域がプラズマを発生させなかった領域である。

表 4.3.3 再現性評価の実験条件

投入電力	110 W
プロセスガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
ガス流量	0.2 L/min
電極－試料間ギャップ	200 μm
酸化時間	5 min

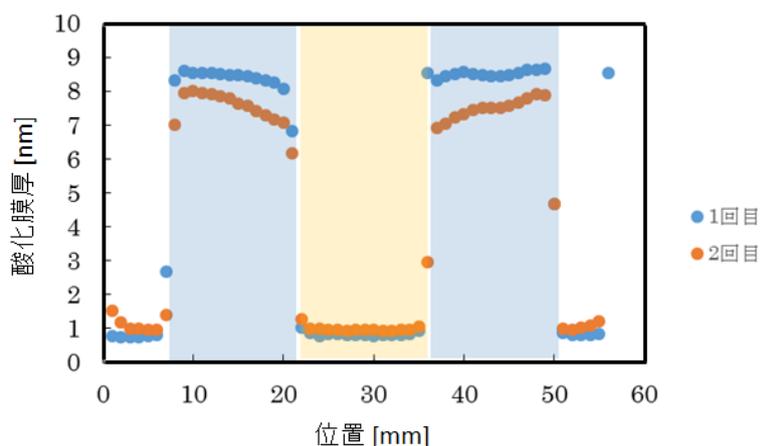


図 4.3.5 酸化膜形状の再現性

1 回目では一つの電極領域内でも均一な酸化膜が形成されているのに対し、2 回目では 7 電極の内側の酸化膜が比較的薄くなるという結果が得られた。この時、プラズマ発生中の

電位センサーの示す値が、1 回目の実験では 0.2634 V → 0.2541 V であった変化量が、2 回目の実験では 0.2769 V → 0.2593 V と大きく異なっており、整合回路内の温度上昇などによってプラズマの状態が変化したことが原因ではないかと考察している。

4.3.4 7 電極装置における酸化膜厚の時間依存性

数値制御加工のため、酸化膜厚の時間依存性を調査した。本実験では、一つの電極領域内における酸化膜厚の平均値を用いて時間依存性を評価したが、膜厚の平均値を取る値の範囲は「隣接する 2 つのデータ点との膜厚差の絶対値のうち少なくとも一方が 0.5 nm 未満であるような範囲」とした。これは、膜厚測定に用いる分光エリプソメトリの特性上、光のスポット径の範囲の平均膜厚が結果として得られるため、スポットが電極境界部分において形成された酸化膜と自然酸化膜の両方にまたがっていた場合、評価したい箇所の酸化膜厚を正當に評価できていない可能性が高いからである。ただし、0.5 nm 以上の差がある場合でも、その位置が明らかに電極直下である場合には平均値に含むこととした。実験条件を表 4.3.4 に、得られた酸化膜厚の時間依存性を図 4.3.6 に示す。図 4.3.6 より、酸化膜厚は時間の増加とともに増加し、10 分間で約 10 nm に達することが分かる。数値制御加工としては約 5 nm 程度の加工を 10 分以内で可能であると考えられる。

表 4.3.4 時間依存性評価の実験条件

投入電力	110 W
プロセスガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
ガス流量	0.2 L/min
電極－試料間ギャップ	200 μm
酸化時間	10 ~ 600 sec

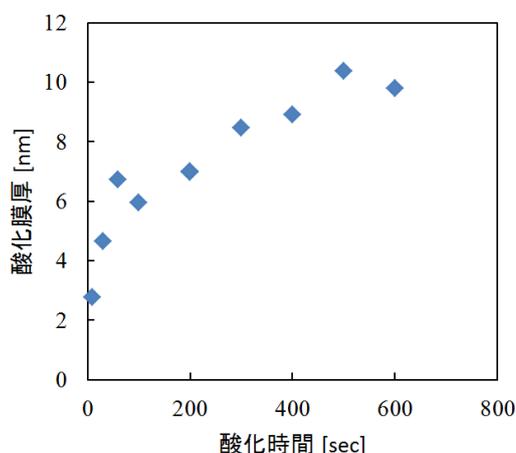


図 4.3.6 酸化膜厚の時間依存性

4.4 スイッチング機構の検討

電圧制御型多電極プラズマ発生装置におけるプラズマ ON-OFF 用スイッチとして、パワーMOSFET を用いることを検討した。本節では、まず MOSFET を用いたスイッチング回路について述べた後、電源周波数、電極電圧の影響について述べ、実用装置に導入する際の回路について説明する。

4.4.1 交流対応のスイッチング回路

一般に、電気回路に用いられるスイッチング機構としては、リレーなどの接触による機械的原理によるものとトランジスタなどの電氣的原理によるものがある。本研究では、電力が投入されたままの状態ですwitchを切り替えるホットスイッチングを行うが機械的原理によるスイッチングでは接点間で放電が生じ、使用中に素子が破壊されるおそれがある。そこで、パワーMOSFET を用いた電氣的なスイッチング回路を採用した。MOSFET は、ゲート電圧の印加によってソースドレイン間にチャンネルを形成し電氣的に導通が得られる機構となっている。

パワーMOSFET は、図 4.4.1 に示すようにソースドレインの方向に pn 接合を持ち寄生ダイオード(ボディダイオード)が存在するため、ソースからドレインへの電流は制御することができない。MOSFET に交流電源を接続し、その入力波形と出力波形を測定したところ、図 4.4.2 のように、寄生ダイオードの順方向側では OFF 状態にならないことが確認された。したがって、高周波電源のスイッチングには、2 つの MOSFET のソース同士を接続した図 4.4.3 のような回路が必要である。プラズマ発生装置に投入する高周波電源をこのスイッチング回路を介して接続し、ゲート電圧印加用の直流電源をソース、ゲート間に接続した。本節以降の実験では、基本的に図 4.4.3 の回路構成で測定を行った。

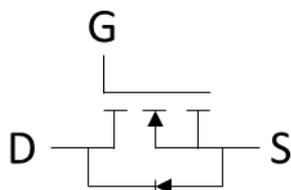


図 4.4.1 パワーMOSFET 素子内寄生ダイオード

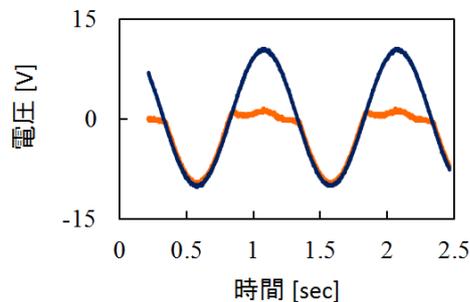


図 4.4.2 パワーMOSFET の OFF 時の入力及び出力波形

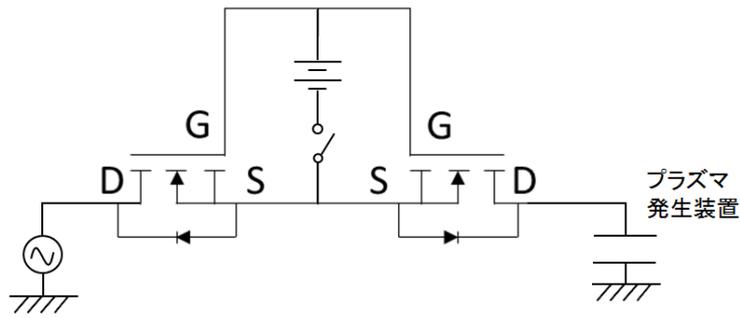


図 4.4.3 スイッチング回路図

4.4.2 電源周波数、電極電圧、素子数の影響

波形発信器(振幅 10 V、周期 1 Hz~13.56 MHz)を用いて、市販のパワーMOSFET(ローム社製 R4008AND)に対して電源周波数が透過率(=出力/入力)に与える影響を調査した。実験を行った回路図と測定点を図 4.4.4 に、各周波数における波形と透過率の周波数特性を図 4.4.5 に示す。

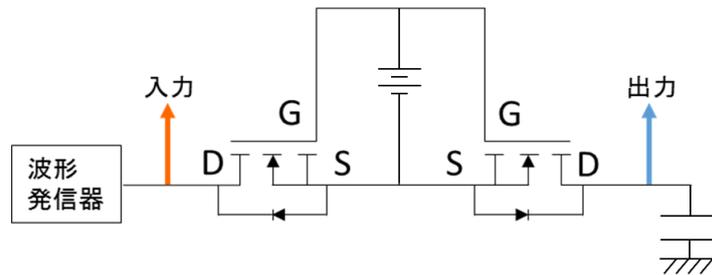


図 4.4.4 基礎検討実験における回路図

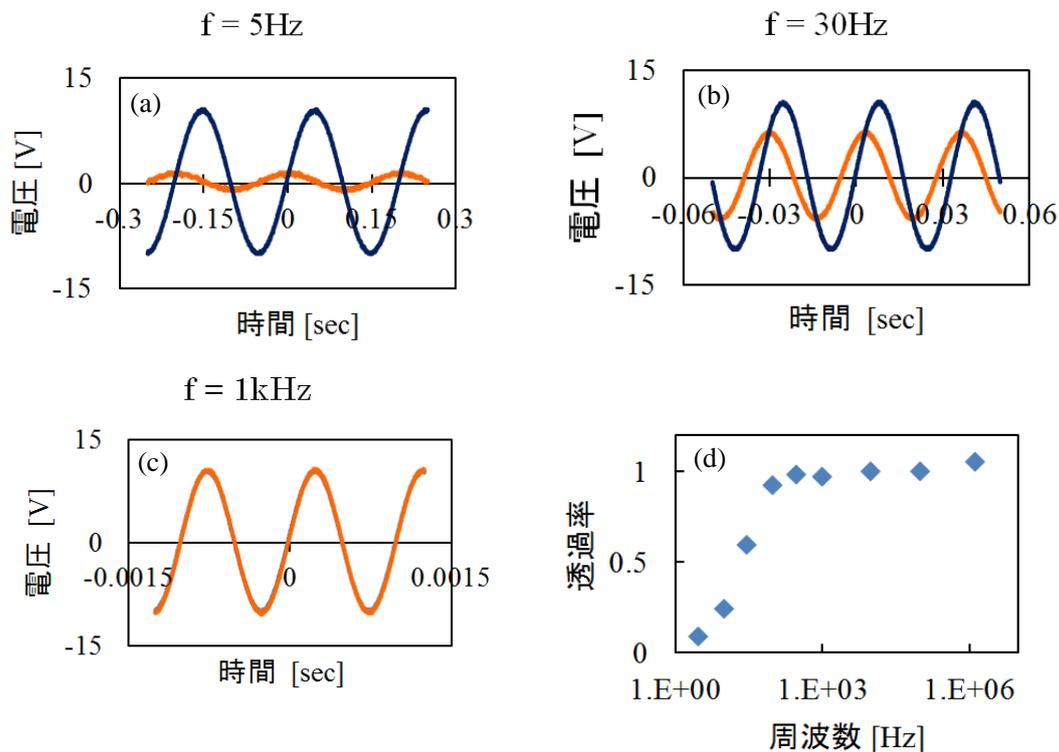


図 4.4.5 各電源周波数における入力波形と出力波形 (a) 5 Hz, (b) 30 Hz, (c) 1 kHz, (d) 透過率の周波数特性

図 4.4.5 より、低周波では電力がよく遮断されているが、高周波側では透過率が增大することが示された。同時に入力波形と出力波形の間に位相のずれが存在することが確認されており、実験を行ったスイッチング回路内に L 成分もしくは C 成分が存在することが分かる。図 4.4.6 に示すように、MOSFET 内部にはゲート、ソース、ドレインの 3 つの端子間に寄生容量が存在しており、その 3 つの寄生容量の和で入力容量、出力容量、帰還容量が定義されている。入力容量はドレイン-ソース間を交流的に短絡させた状態でのゲート-ソース間の容量、出力容量はゲート-ソース間を交流的に短絡させた状態でのドレイン-ソース間の容量、帰還容量はソースを接地した状態でのドレイン-ゲート間の容量、と表される。交流回路における容量のインピーダンスは

$$X_c = -j \frac{1}{\omega C} \quad (4.4.1)$$

で表され、(4.4.1)式における ω が大きくなるため、インピーダンスが小さくなり透過率が上昇したと考えられる。

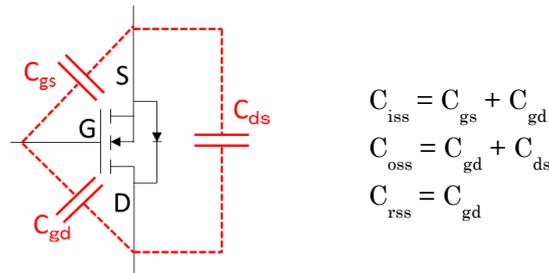


図 4.4.6 寄生容量と入力容量 C_{iss} 、出力容量 C_{oss} 、帰還容量 C_{rss} の関係

図 4.4.5 の実験では、波形発信器を用いて振幅 10 V という条件で、電源周波数の影響について調査した。しかし、プラズマ発生には最大数百 V の電圧がかかるため、ドレイン電圧として数百 V の電圧をかけて評価する必要がある。なお、MOSFET の寄生容量は素子毎に一定値をとるのではなく、ドレイン電圧によって変化する。その特性の例を以下の図 4.4.7 に示す。

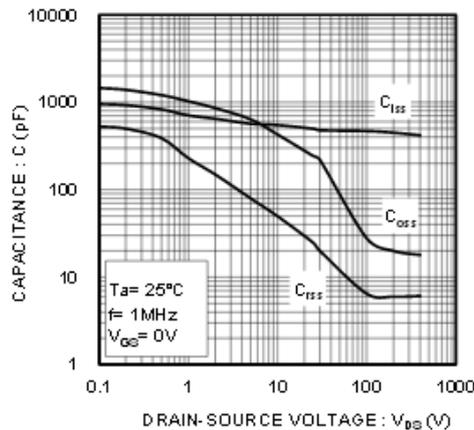


図 4.4.7 寄生容量の D 電圧(V_D)特性

(ROHM 社 R4008AND Data Sheet より)

このようにドレイン電圧を上げるにつれて寄生容量は小さくなる。これは、ソースドレイン間に印加される逆バイアスが大きくなるにつれ、大きな空乏層が形成されることが原因であり、一般的な容量の式である、

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (4.4.2)$$

における d が大きくなるためであると考えられる。

上記の特性を検証するため、図 4.4.4 と同じ回路において、周波数は 13.56 MHz としドレ

イン電圧のみを変化させた際の透過率を測定した。その結果を以下の図 4.4.8 に示す。

このようにドレイン電圧を大きくすると出力容量が小さくなり、その結果、透過率も減少することがわかった。前述の通り、プラズマ発生装置においては、MOSFET には数百 V の高い電圧がかかるため、より低い透過率を得ることができることとなる。

また、ゲート電圧が OFF 時の容量を減少させるのであれば、MOSFET の素子数を増やし、それらを直列に接続することで合成容量が小さくなることを見込まれ、透過率は低く抑えることができると考えられる。したがって、素子数を 2 組、3 組、5 組に増やし、各々の場合の透過率を調査した。この実験では、高周波電源から直接 MOSFET に電力を投入するのではなく、整合回路を通して電力を投入した。その回路図を以下の図 4.4.9 に、その結果を以下の図 4.4.10 に示す。

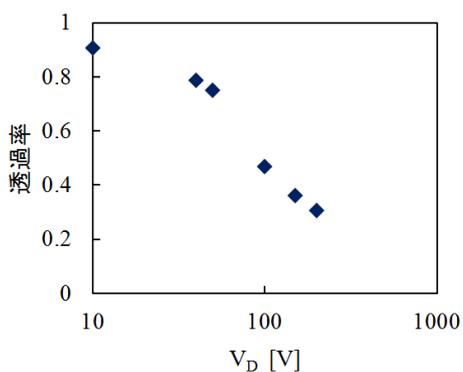


図 4.4.8 OFF 時のドレイン電圧 V_D と透過率の関係

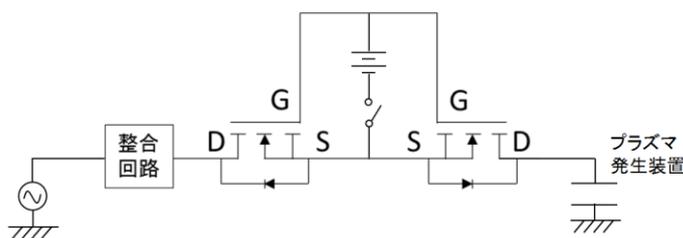


図 4.4.9 素子数の影響を調査する際の回路図

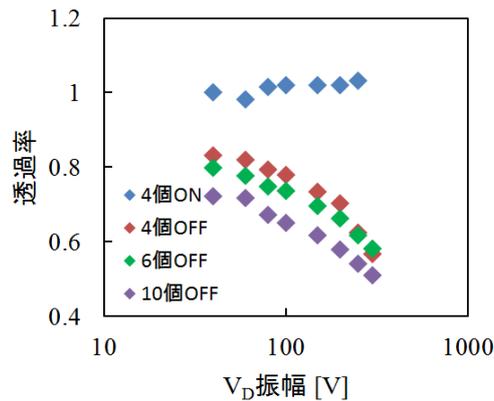


図 4.4.10 素子数の透過率への影響

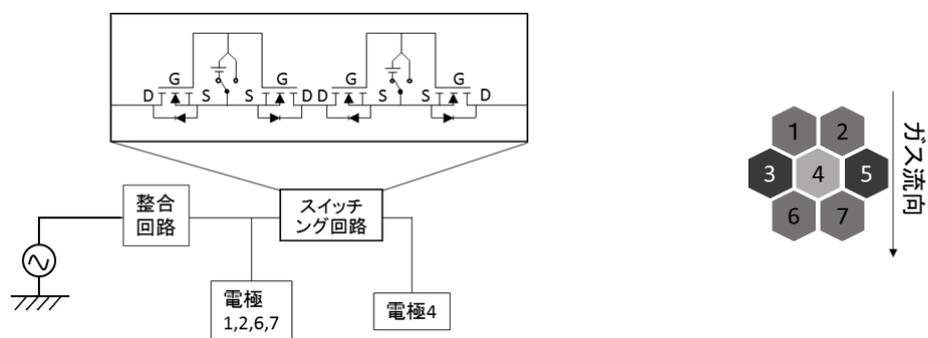
図 4.4.10 の結果より、素子数が多いほど透過率は減少していることが分かる。各電極装置においては、対辺 14 mm の六角形にそのスイッチング回路を取めなければならない。したがって、スイッチング回路の大きさも考慮し、2 組の MOSFET(4 個)を用いるものとして以降の実験を行った。

4.4.3 MOSFET を用いたプラズマの独立制御

プラズマスイッチングを行うための MOSFET を用いたスイッチング機構について述べてきたが、MOSFET のスイッチングにはゲート電圧のスイッチングにより行う。つまり ON の時にはゲート電圧を印加し、OFF の時にはゲート電圧を 0 V、すなわちゲートとソースを等電位にしなければならない。したがって、ゲート電圧のスイッチングにはソース-ゲート間において回路の切り替えが必要であるため、図 4.4.11(a)に示すように、リレーを用いて電圧のスイッチングを行う回路を作成し実験を行った。

図 4.4.12(b)に示した 7 電極装置の電極配置図において No.1、2、6、7 電極には常に電力を投入してプラズマを発生させ、それらに隣接する No.4 電極にスイッチング回路を接続しプラズマのスイッチングが可能な機構とした。そのプラズマの発生/消滅は装置側面から、つまり No.3 電極側から図 4.4.12 のように確認することができた。このスイッチング機構を導入した装置を用いてプラズマを常に発生させている領域とスイッチングを行う領域の 2 領域に分けて酸化時間による膜厚制御の評価を行った。実験条件を以下の表 4.4.1 に、No.1、No.4、No.7 電極の方向に 1 mm ピッチで酸化膜厚を測定した結果を図 4.4.13 に示す。青色の領域が No.1 と No.7 電極に、黄色の領域が No.4 電極の領域に対応している。MOSFET を用いたスイッチング回路を介した部分である No.4 電極の領域も酸化時間 100 秒でおよそ膜厚 6nm の酸化膜が形成されており、スイッチング回路を導入したことによる酸化速度への影響も少ないと考えられ、今回提案したスイッチング機構はプラズマのスイッチングに適していると思われる。このスイッチング機構の大きさはリレー素子の大きさに制限される

ため、従来のソレノイドコイルを用いたスイッチング機構よりも大幅な加工分解能の向上が期待できる。



(a) リレーを用いたパワーMOSFETのスイッチング回路 (b) 電極配置と電極番号

図 4.4.11 スwitching回路図



(a) No.1, 4, 7 電極発生状態



(b) No.4 電極消滅状態

図 4.4.12 プラズマの発生/消滅の確認

表 4.4.1 プラズマ制御の確認実験での条件

反応ガス組成、ガス流量	He : O ₂ = 99 : 1 、 0.2 L/min
電極－試料間距離	500 μm
投入電力	110 W
酸化時間	No.4 電極 : 100 sec No.1、 2、 6、 7 電極 : 600 sec
プラズマ発生電極数	5 → 4

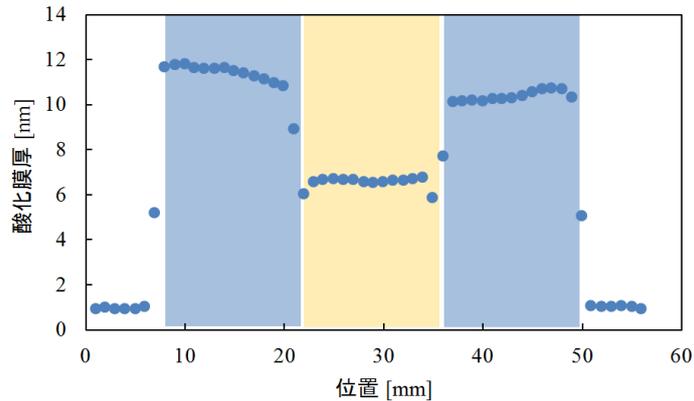


図 4.4.13 スイッチングによる酸化膜厚制御

4.4.4 プラズマ制御の応答速度評価

本装置を用いて実際に数値制御加工を行う際には、全電極直下でプラズマを生成した状態から加工を始め、必要な加工量に達した領域からプラズマを消滅し、プラズマの発生時間を制御することで加工量の制御を行う。前述のスイッチング機構の性質上、リレー素子の応答速度や MOSFET の応答速度による応答の遅れが存在する事が考えられる。高精度な加工を行うためには、プラズマ制御の応答速度を評価し考慮に入れた上でプログラムでのプラズマ照射時間を決定しなければならない。そこでフォトダイオードを用いて作製したフォトセンサーにより、プラズマの光を電気信号に変換したものと、リレー素子の入力信号をそれぞれモニタすることによりプラズマ制御の応答速度評価を行った。

プラズマが発生状態から消滅するまでは図 4.4.14 に示すような流れを経る。応答速度評価は、リレー素子の入力信号とプラズマの光をフォトセンサーにより電気信号に変換したものをモニタする事で行った。図 4.4.15 にフォトセンサーの回路図と外観を示す。9V の電源には乾電池を用い、高周波によるノイズの影響を低減するため、アルミニウム製の箱で覆った。また、実験室の電気を落とし暗い条件下で実験を行った。No.1、2、4、6、7 電極直下においてプラズマを発生させ、No.1、2、6、7 電極は発生させたまま、No.4 電極直下のプラズマの光量を装置側面からフォトセンサーにより観測した。図 4.4.16 に応答速度評価の結果を示す。

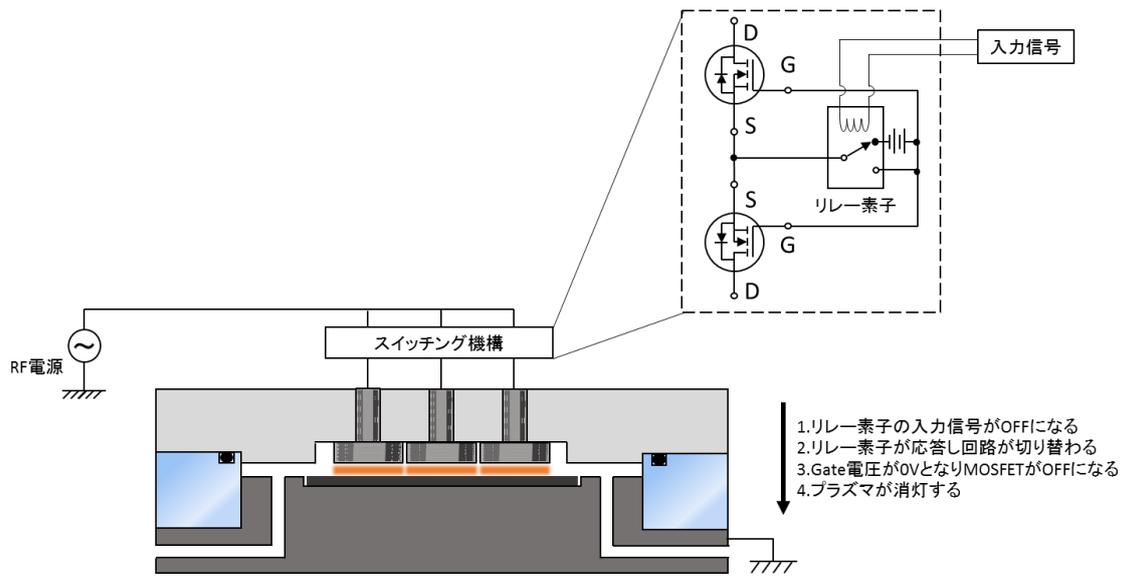


図 4.4.14 プラズマの応答までの流れ

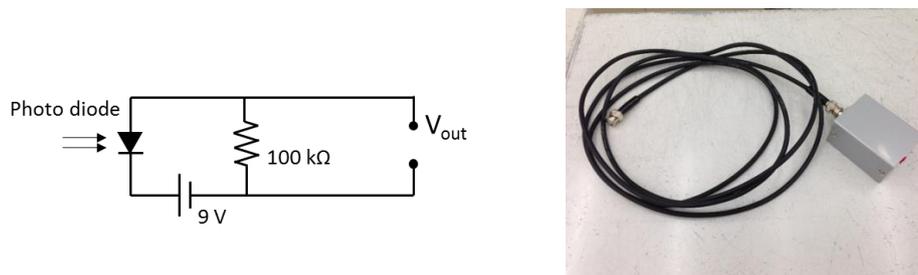


図 4.4.15 フォトセンサーの回路図と外観

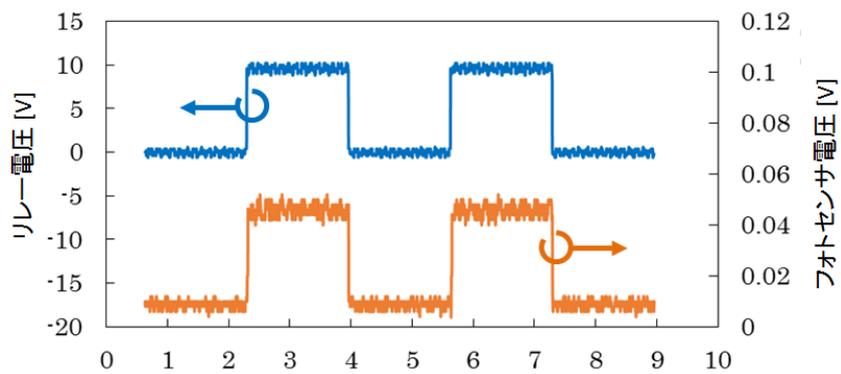


図 4.4.16 応答速度評価

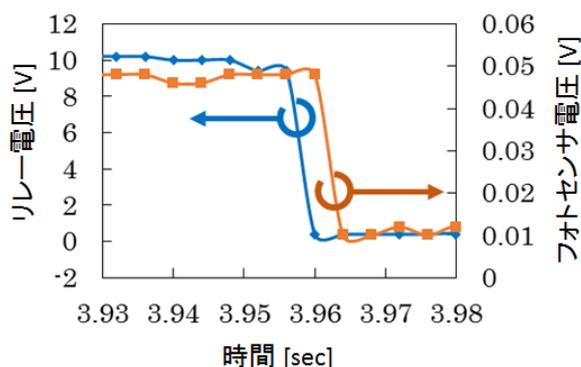


図 4.4.17 応答速度評価(詳細)

図 4.4.16 よりリレー素子の入力信号と No.4 電極直下のプラズマの発生状態が対応しており、確実なプラズマ制御が実現できていることが分かる。また、ON から OFF にスイッチした領域を拡大したものを図 4.4.17 に示す。図 4.4.17 より、プラズマの応答速度は 4 msec 以下であることが分かる。今回用いたリレーは応答速度が 3 msec であることが分かっており、このプラズマスイッチングの遅れの主な原因はリレーにあると考えられる。数値制御加工の加工時間は秒単位で制御を行うため、プラズマスイッチングの応答性は十分に良いといえる。

4.4.5 使用する素子の最適化

表 4.4.2 に投入電力を変化させた際のプラズマの ON-OFF 制御性について実験した結果を示す。65 W では意図した通りに ON-OFF が可能であったが、86 W まで電力を増大させると OFF 状態の電極にもプラズマが発生した。

表 4.4.2 投入電力とプラズマの制御性

投入電力	No.1	No.2	No.1 直下の プラズマ	No.2 直下の プラズマ	電位センサ
50 W	ON	ON	消滅	消滅	0.232 V
65 W	ON	OFF	発生	消滅	0.242 V
86 W	ON	OFF	発生	発生	0.258 V

より広範囲の投入電力においても確実なプラズマの制御を実現するため、小型かつ寄生容量の小さい素子を用いることとし、ROHM 社の R4008AND から ST Microelectronics 社の STN1NK60Z に変更した。それぞれの寄生容量の Drain 電圧特性とそれぞれの素子を 2 つ使用した回路における電圧振幅透過率を図 4.4.18、4.4.19 に示す。どちらも 1 MHz における特性を示したものであり、13.56 MHz においては異なる特性を示すと予想されるが、相対的な

容量の大小は比較できると考えた。また従来の素子と比較して、電圧振幅の透過率が大幅に改善されている事からより確実なプラズマの制御が期待でき、実際に過剰な電力を投入した状態でのプラズマの制御を実現した。最終的には OMRON 社の 2c 接点を有するリレー素子(G6K-2F-Y)を用い、図 4.4.20 に示す回路にてプラズマの ON-OFF 制御を行うこととした。

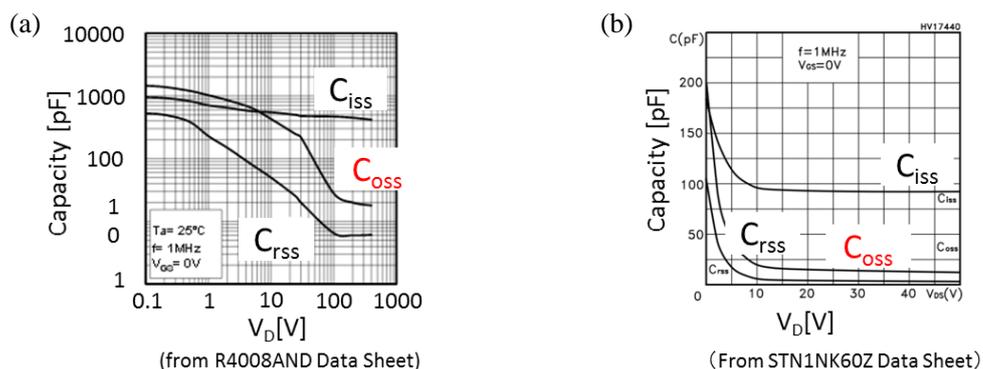


図 4.4.18 各 MOSFET の入力容量、出力容量、帰還容量 (a) ローム社 R4008AND, (b) STMicroelectronics 社 STN1NK60Z

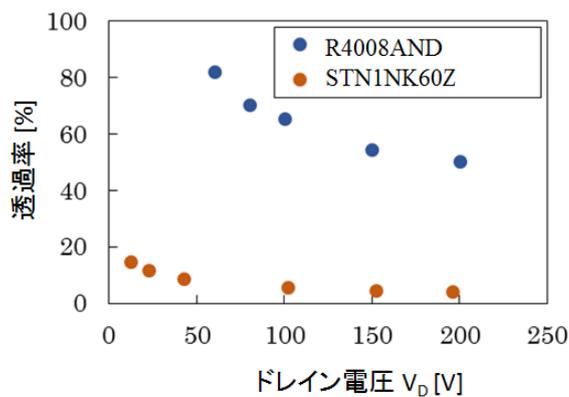


図 4.4.19 用いた素子における寄生容量のドレイン電圧特性と透過率

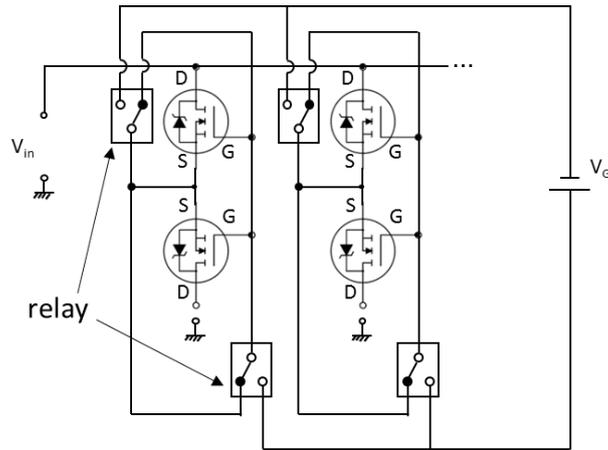


図 4.4.20 スイッチング回路 回路図

4.5 7 電極装置における数値制御実験

数値制御実験の際の投入電力の制御手法として(i)発生面積に応じた制御と(ii)電極電圧に応じた制御を検討した結果について、電極電圧をモニタする為の高周波プローブの作成と併せて述べる。そして、試作した 7 電極装置において実施した、Si ウェハを用いた数値制御酸化実験と SOI ウェハを用いた数値制御犠牲酸化加工実験の結果について述べる。

4.5.1 プラズマ発生面積に応じた投入電力制御

プラズマ発生面積に応じた投入電力制御を検討した。実験に先立ち、1つの電極のみを用い、40 W の電力を投入した際の酸化膜厚の時間依存性を調査した。実験条件を表 4.5.1、結果を図 4.5.1 に示す。

そして、1つの電極あたりに 40 W の電力を投入した際の酸化膜厚を調査した。つまりプラズマが発生している電極が 3つの際には 120 W、2つの際には 80 W という様に、プラズマの発生面積に応じて投入電力を制御した。実験条件を表 4.5.2、結果を図 4.5.2 に示す。

表 4.5.1 投入電力の制御手法の検討に先立つ酸化特性調査

反応ガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
電極－試料間距離	150 μm
投入電力	40 W
酸化時間	2、4、6 min

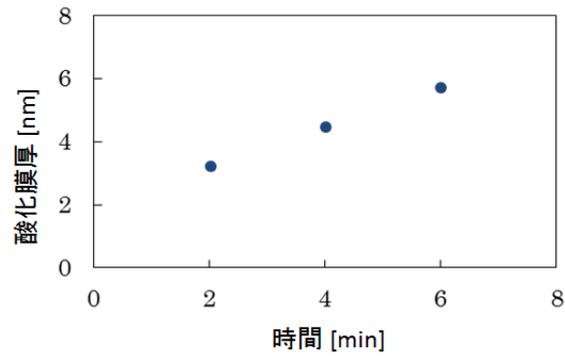


図 4.5.1 1 電極に 40 W を投入した際の酸化特性

表 4.5.2 発生面積に応じた投入電力制御を行った際の実験条件

反応ガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
電極－試料間距離	150 μm
投入電力	120、80、40 W
酸化時間	2、4、6 min

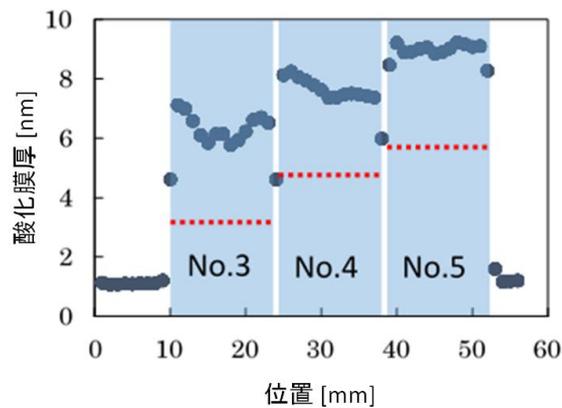


図 4.5.2 1 電極あたりに 40 W を投入した際の酸化膜厚

図 4.5.2 中の青い領域は各電極直下の領域を示しており、破線は先の実験より予測される酸化膜厚を示している。この結果より、酸化膜厚は予測される厚さと比べて大幅に増加しており、プラズマの発生面積に応じた投入電力制御は不適であると考えられる。この原因として、整合回路には負荷に並列にコンデンサを有しているが、この電気容量は電極試料間の電気容量より十分に大きく、プラズマの発生電極数が 2 倍、3 倍になったとしても、プラズマ発生前の電気容量の 2 倍、3 倍になるわけではない。にも関わらず、2 倍や 3 倍の電

力を投入したことで大きな電圧が生じ、酸化速度が大きくなったものと考えられる。以上より、発生面積に応じた投入電力制御以外の制御手法の確立が必要となる。

4.5.2 電極電位に応じた投入電力制御

電極電圧(電極における高周波振幅)をモニタすることによる投入電力制御について検討した。図 4.5.3 に作成した高周波プローブの回路図と外観を示す。この高周波プローブは 13.56 MHz の高周波を検波し、およそ 50 V 未満の直流電圧で出力するものとなっている。図 4.5.3(b)のプローブ端子を各電極上部に取り付け、データロガー(グラフテック社)により計測データをモニタする。

図 4.5.4 に投入電力と高周波プローブにより測定した電極電圧(電圧振幅)の関係を示す。電圧振幅はあらかじめオシロスコープを用いて高周波プローブの出力電圧との対応を調査することにより算出した。投入電力の増加に応じて電極電圧が 1 対 1 に対応しており、実験中の各電極電圧のモニタが可能となる。高周波プローブは個々の電極に接続しているが、個々の電極に投入する電力をそれぞれ調整することはできないため、数値制御実験を行う際にはモニタしている全電極電圧の平均値が意図した電圧となる様に投入電力を制御するか、プラズマ発生時間が最も長い電極のみをモニタし、投入電力の制御にフィードバックするものとする。

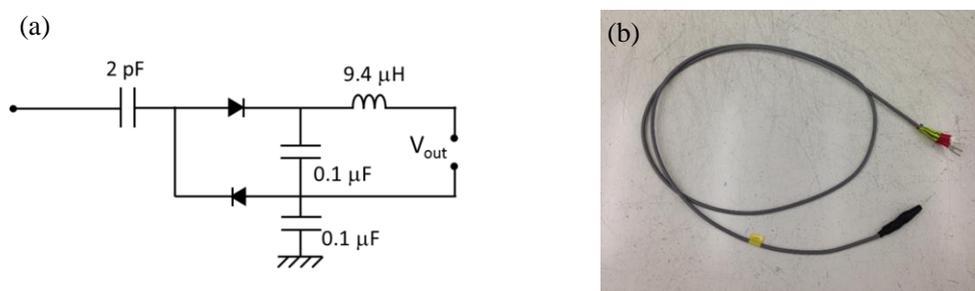


図 4.5.3 (a) 高周波プローブの回路図, (b) プローブの外観

作製した高周波プローブを用いて3つの電極において酸化実験を行った。実験条件を表 4.5.3 に示す。実験開始時には3つの電極直下でプラズマを発生させ、2分ごとに消滅していった。図 4.5.5 に実験中の各電極電圧の推移を示す。これより酸化を行う際には電極電圧が常に 190 V 程度に保たれていることが分かる。また 40 sec 手前まで電極電圧が高くなっているのはプラズマ発生前であり、その後プラズマ発生により電圧降下が起こっている事も読み取れる。

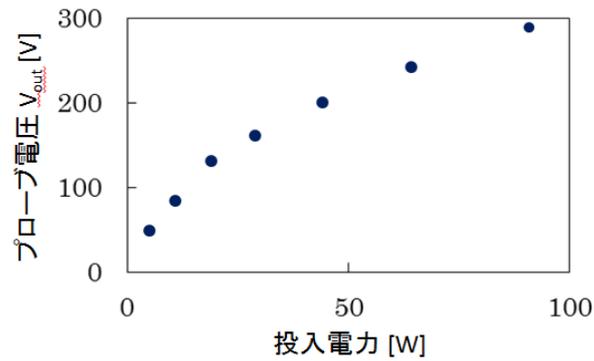


図 4.5.4 投入電力と高周波プローブの出力電圧

表 4.5.3 電極電位に応じた投入電力制御を行った際の実験条件

反応ガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
電極－試料間距離	150 μm
投入電力	電極電圧が 190 V となるよう調整
酸化時間	2、4、6 min

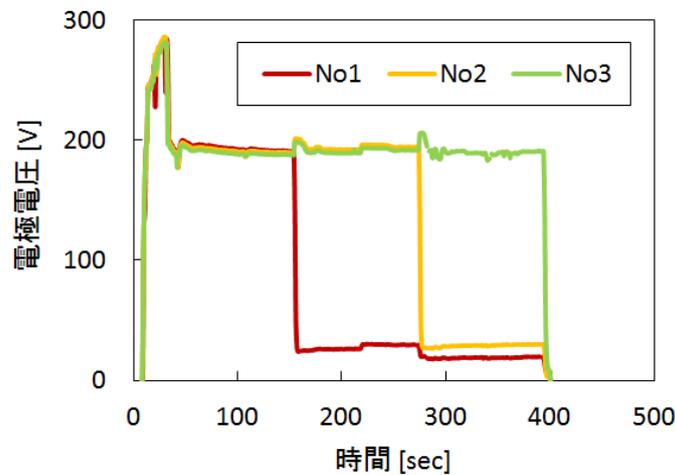


図 4.5.5 実験中の各電極電圧の推移

図 4.5.6 に得られた酸化膜厚の分布を示す。図中の破線は予測される酸化膜厚を示しているが、図 4.5.2 のプラズマの発生面積に応じた投入電力制御と比較して予測される酸化膜厚と良い一致を示しているため、電極電圧のモニタによる投入電力制御が妥当であると考えられる。また、1つの電極領域内における酸化膜厚のばらつきは、アルミ電極表面の数十マイクロメートル程度の形状に対応しているものであり、ON-OFF 制御の実験においては無視してよいものである。

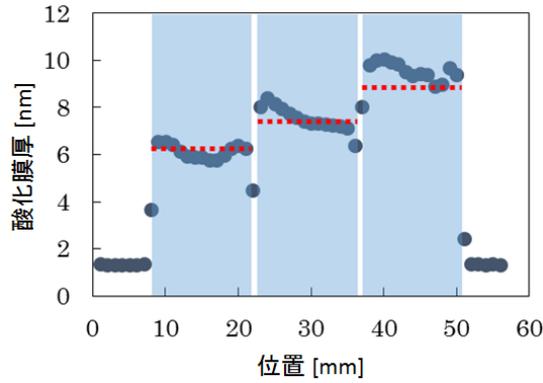


図 4.5.6 電極電圧 190 V における酸化膜厚分布

4.5.3 7 電極装置における数値制御実験

数値制御実験を行うにあたり、各電極の酸化特性の差を評価する事が重要となる。そこで数値制御実験に先立ち、電極電圧 190 V の条件下において 7 電極での全面酸化実験により酸化速度を評価した。その際の実験条件を表 4.5.4、酸化膜厚の時間依存性を図 4.5.7 に示す。各電極の酸化特性の近似には対数近似を用いた。

表 4.5.4 7 電極装置における個々の電極の酸化特性評価の実験条件

反応ガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
電極－試料間距離	150 μm
投入電力	電極電圧が 190 V となるよう調整
酸化時間	30、60、240、480 sec

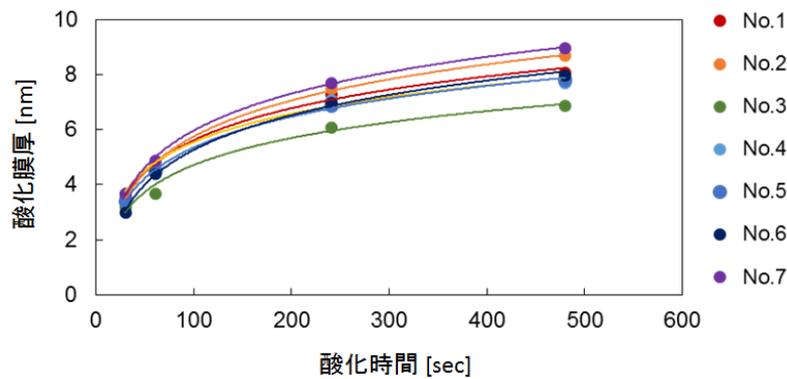


図 4.5.7 各電極の酸化特性

試料として p 型 Si ウエハを用い、7 領域において数値制御酸化実験を行った。No.1 電極から No.7 電極までの各電極でナノメートルオーダーの酸化膜厚制御を目指し、目標膜厚と図 4.5.7 の酸化特性から算出した酸化時間を表 4.5.5 の様に設定した。

表 4.5.5 各領域の目標酸化膜厚と酸化時間

電極 No.	1	2	3	4	5	6	7
目標酸化膜厚 [nm]	9	8	7	6	5	4	3
酸化時間 [sec]	746	327	492	135	80	50	22

No.2 電極と比較して No.3 電極の方が、目標酸化膜厚が薄いにも関わらず酸化時間が長くなっているのは、図 4.5.7 における酸化特性の差によるものである。具体的には 7 つ配置したアルミ電極の表面が数十マイクロメートルのレベルで揃っておらず、電極－試料間距離が僅かに異なるためであると考えられる。実験条件を表 4.5.6、実験結果を図 4.5.8 に示す。図 4.5.8 から分かるように各領域においてナノメートルオーダーの酸化膜厚制御に成功した。No.2 電極において 1 nm ほど酸化膜厚が不足しているが、これは酸化特性を算出する際の試行回数が少なく、No.2 電極の酸化特性を正しく評価できていなかったことが原因であると考えられる。

最後に 7 電極装置において行った数値制御犠牲酸化による SOI ウエハの Si 薄膜層膜厚均一化加工を行った。図 4.5.9 に加工前の測定結果と予測される結果を示す。多電極型大気圧プラズマ発生装置において、1 つの電極領域内の加工は不可能であるため、測定した膜厚の平均値を「その電極領域の膜厚」として目標とする SOI 層膜厚までの加工量を算出した。酸化膜厚に対する Si の加工量割合は 60 % として各領域の酸化膜厚、酸化時間を決定した。これを表 4.5.7 に、実験条件を表 4.5.8 に示す。

表 4.5.6 数値制御酸化実験での条件

反応ガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
電極－試料間距離	150 μm
投入電力	電極電圧が 190 V となるよう調整
酸化時間	表 5.11 に従う

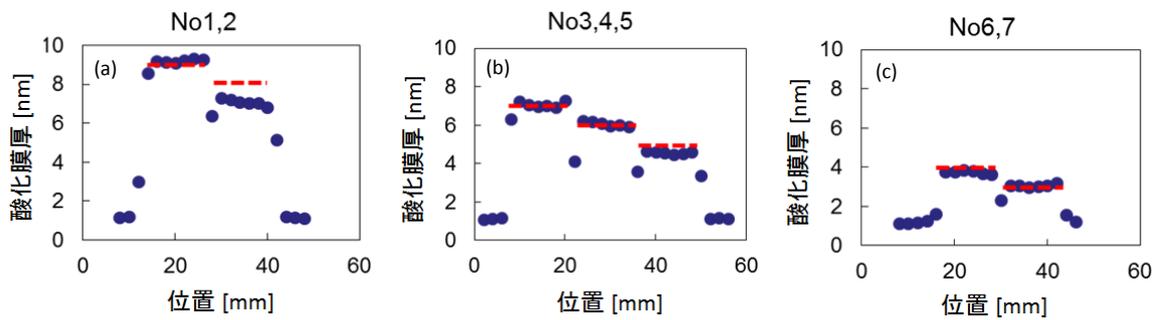


図 4.5.8 数値制御酸化実験，(a) No. 1, 2 電極，(b) No. 3, 4, 5 電極，(c) No. 6, 7 電極

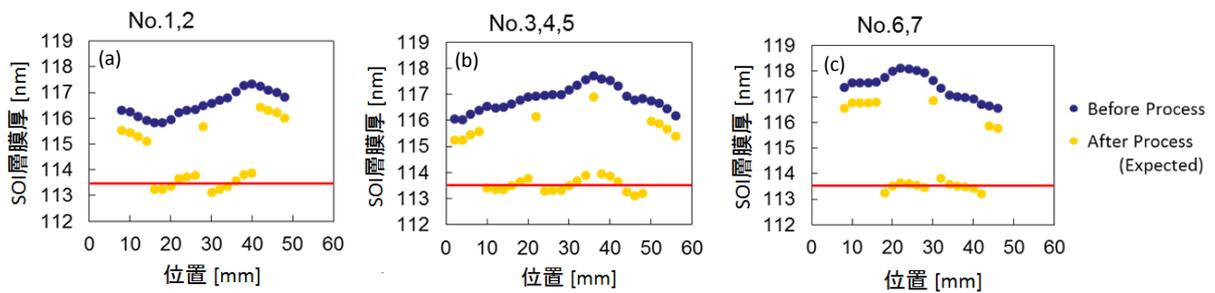


図 4.5.9 加工前の測定結果と加工後予測，(a) No. 1, 2 電極，(b) No. 3, 4, 5 電極，(c) No. 6, 7 電極

表 4.5.7 各電極領域の目標加工量，酸化膜厚，酸化時間

電極 No.	1	2	3	4	5	6	7
目標加工量 [nm]	2.6	3.5	3.1	3.7	3.7	4.5	3.5
目標酸化膜厚 [nm]	4.3	5.8	5.2	6.1	6.1	7.5	5.8
酸化時間 [sec]	46	100	144	146	159	336	94

表 4.5.8 数値制御犠牲酸化加工の実験条件

反応ガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
ガス流量	1.0 L/min × 10 min → 1.0 L/min
電極－試料間距離	150 μm
投入電力	電極電圧が 190 V となるよう調整
酸化時間	表 5.15 に従う

本実験を行う際には、プラズマの発生時間が最も長い No.6 電極に高周波プローブを設置し、電極電圧が 190 V となるように投入電力を制御した。結果を図 4.5.10 に示す。7 領域での SOI 層の膜厚平均値において、P-V 1.91 nm を P-V 1.08 nm まで改善することに成功した。これより、可動部のない多電極型大気圧プラズマ発生装置を用いて数値制御犠牲酸化加工が可能であることを実証した。

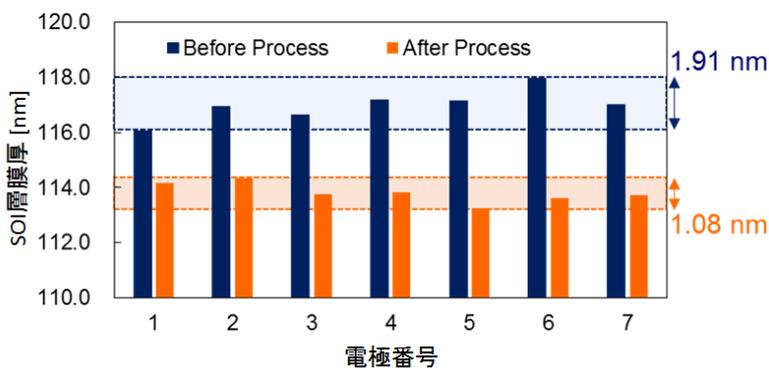


図 4.5.10 数値制御犠牲酸化加工の結果

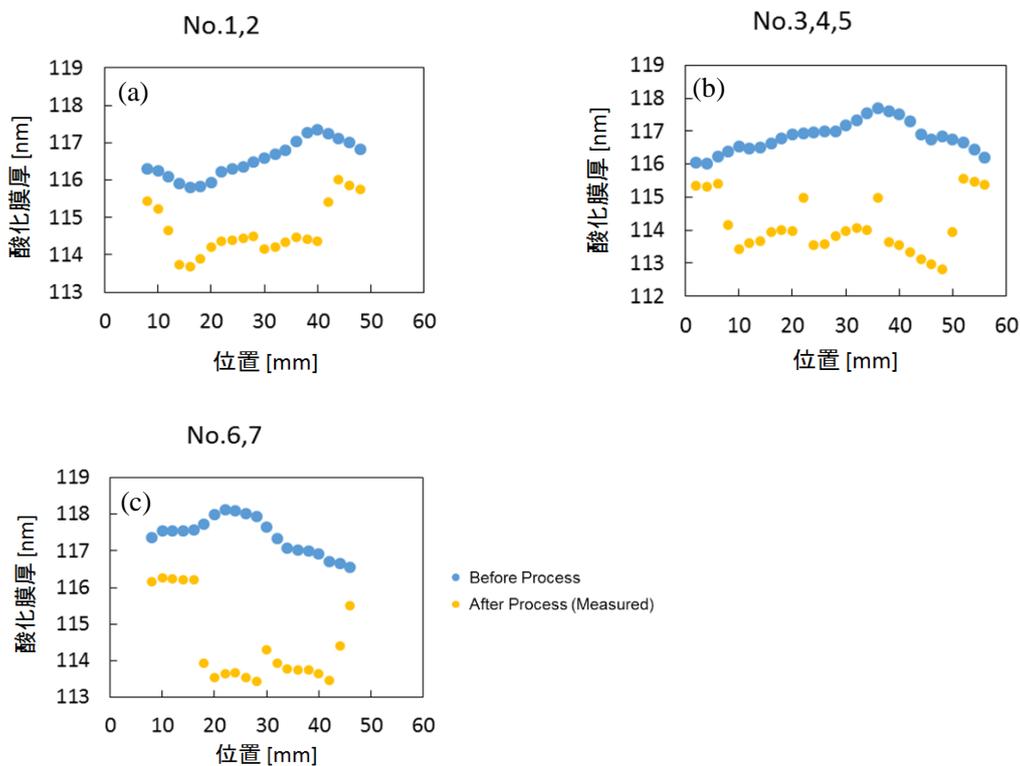


図 4.5.11 加工前の測定結果と酸化膜厚, (a) No. 1, 2 電極, (b) No. 3, 4, 5 電極, (c) No. 6, 7 電極

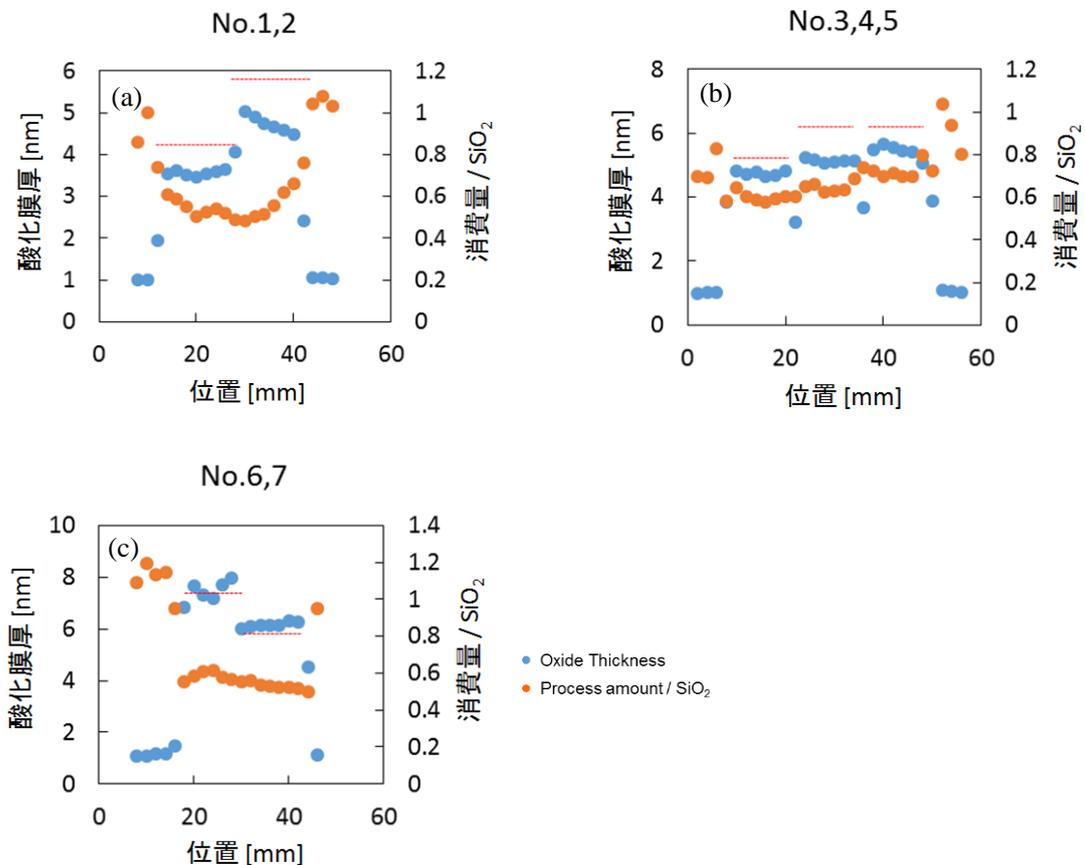


図 4.5.12 SOI 層加工量の割合 (a) No. 1, 2 電極, (b) No. 3, 4, 5 電極, (c) No. 6, 7 電極

加工後の SOI 層膜厚を詳細に測定した結果と酸化膜厚、及び酸化膜厚に対する SOI 層の加工量の割合を図 4.5.11 と図 4.5.12 に示す。図 4.5.11 の No.1~No.5 の酸化膜厚が目標とした酸化膜厚に届いていない点については、先に述べた数値制御酸化実験と同様に、酸化特性を正しく評価できていなかった可能性や、高周波プローブの測定再現性が悪かったために電極電圧が 190 V に達していなかった可能性が考えられる。また本実験において、酸化膜厚に対する SOI 層加工量の割合は 60 % としたが、各電極ともその値からのずれが見られる。この割合の不確かさは今後、更なる加工の高精度化を実現するための検討課題である。

4.5.4 加工後表面の評価

数値制御犠牲酸化加工に用いた試料の未加工領域と加工領域を、AFM(Atomic Force Microscope ; 原子間力顕微鏡)により評価した結果を図 4.5.13 に示す。未加工表面においては特徴的な形状は見られず、極めて平坦な表面であると言える一方、加工後表面には直

径数マイクロメートルオーダーの特徴的な丸い模様が見られる。これらの模様は、どの試料の未加工表面にも見られず、犠牲酸化加工により現れたものである。これらの特徴的な形状が現れる原因を断定するには至っていないが、デバイスの作製を考慮に入れると実用化に向けて解決しなければならない課題である。

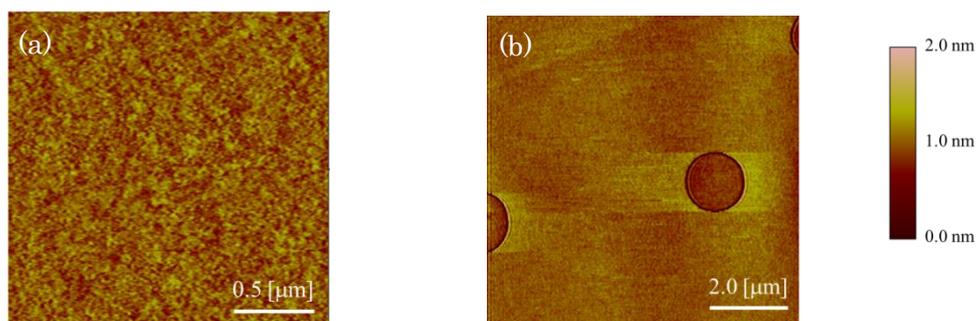


図 4.5.13 加工後表面形状の評価 (a) 未加工表面、(b) 犠牲酸化加工後表面

4.6 結言

本章では、個々の電極の印加電圧を制御する方式の多電極プラズマ発生装置に関して基礎検討を行った。電極試料間距離制御方式と異なり各電極は互いに絶縁されている必要があることから電極間距離の検討を行うとともに、印加電圧の ON/OFF 制御を行うためのスイッチング機構について検討した。そして、7 個の電極を有する基礎実験装置を試作して特性を評価した。以下に得られた結果を列挙する。

- 1) 各電極間に形成される浮遊容量によって高周波電力が伝わることから、個々の電極の印加電圧を独立に制御するためには、その浮遊容量を十分小さな値に抑える必要がある。そこで、電極間距離が可変の 2 個の電極を有する大気圧プラズマ発生装置を試作し、個別にプラズマの発生・消滅を制御可能な電極間距離について検討した結果、厚さ 2 mm の電極を用いた際には、300 μm 程度の間隔を設ければ良いことが分かった。
- 2) 電極間隔を 100、200、300 μm として酸化実験を行い電極間部の酸化膜厚について詳細に測定した結果、いずれの距離においても電極間部に酸化されていない領域は見受けられず、連続的なプラズマ処理が可能であることが分かった。
- 3) 電極形状を対辺間距離 14 mm の六角形とする 7 個の電極を有する多電極大気圧プラズマ発生装置を試作しプラズマ酸化実験を行った。安定にプラズマを発生させるには電極と試料間の距離は 200 μm が最適であること、また投入電力は 110 W 前後が最も安定していることが分かった。

- 4) 処理時間を 10~600 秒としてプラズマ酸化実験を行い酸化膜厚の酸化時間依存性を調べた結果、酸化速度は約 100 秒まではほぼ一定であるが、その後は緩やかに減少してゆくことが分かった。
- 5) 各電極への印加電圧の ON/OFF 制御のために、パワーMOSFET を 2 個直列に接続する方式を検討し、高周波プラズマの ON-OFF 制御を行うことが可能であることを示した。
- 6) プラズマ発光強度を検出するプローブを作成し、プラズマを OFF する際の応答速度を評価したところ、4 msec 以下であることが分かった。
- 7) MOSFET 内部の寄生容量ため、OFF 時であっても高周波電力はある程度透過すること、およびその寄生容量は MOSFET 中の空乏層の広がりによって変化することから、OFF 時の電力透過率はソースドレイン間電圧にも依存することが分かった。
- 8) 寄生容量の小さい MOSFET を用いることで、OFF 時の透過電力を抑制でき、より大きな電力まで投入可能であることが分かった。また、試作装置用の MOSFET を選定し、周辺回路を含めたプラズマスイッチング用電気回路を構築した。
- 9) プラズマ発生電極数に応じた投入電力制御法について検討した結果、プラズマの発生面積に比例して投入電力を制御するのではなく、電極電圧を一定に保つ制御を行うことで、目標通りの膜厚の酸化膜を得ることが可能であることを示した。
- 10) 7 個全ての酸化膜厚の酸化時間依存性を調べたところ、スイッチング素子である MOSFET の個体差(オン抵抗など)により、多少酸化速度に差があることが分かった。精密な加工のために、各電極の酸化速度に合わせて酸化時間を設定する必要があることが分かった。
- 11) Si 基板を用いて数値制御酸化実験を試みたところ、7 個全ての電極領域において予想される厚さの酸化膜との誤差が 1 nm 以下であることを示した。また、市販 SOI ウェハの Si 層膜厚均一化加工実験を行ったところ、加工前に 1.91 nm であった厚さばらつきを、加工後には 1.08 nm に改善することに成功した。

新しいプラズマスイッチング手法の採用と、適切な電極間距離の検討によって全面一括型数値制御加工を行うことが可能な装置を設計製作することができた。電圧制御型ではパワーMOSFET を用いるため、素子の耐圧までしか電力を投入することはできないため、ギャップ制御型とは異なり大電力を投入することで加工速度の向上を目指すことは難しい。しかし、パワーMOSFET は小さな素子も入手しやすいため、電極を小型化し数値制御加工の高空間分解能化が可能である。このことから、電圧制御型は短周期の形状誤差を修正する用途に適していると言える。

第 5 章 薄膜多電極大気圧プラズマ発生装置による 数値制御加工

5.1 緒言

前章では多電極型大気圧プラズマ発生装置の開発に先立ち、対辺間 14 mm の六角形の電極面を持つ 7 つのアルミニウム製電極を用いて装置を試作し検討を行ったが、個々の電極領域内において酸化膜厚分布の 1~2 nm 程度のばらつきという、加工の精度を悪化させる現象が見られた。また、将来的に半導体基板などは大口径化していくことが予想され、それに伴い試料に対して一括加工を行うためには更に多数の電極を敷き詰める事が要求され、同時に加工分解能向上のためには電極サイズを小さくすることも要求される。しかしアルミニウム製のバルク電極でその要求に応えることは困難であると考えられる。

本章では、電圧制御型大気圧プラズマ発生装置をより高精度に、かつ、このような「大面積化・加工分解能向上」に将来的に対応しうる手法とするため、新たに考案した薄膜電極とそれを用いて行った数値制御加工実験の結果について述べる。

5.2 薄膜電極の検討

第4章の7電極装置ではアルミニウム製電極の表面が数十 μm のレベルで揃っておらず、各電極において電極-試料間距離が僅かに異なり、それに由来する酸化特性の差が存在した。電極表面の高さが揃っていない場合の例として、7 電極装置において行った実験を図 5.2.1 に、実験条件を表 5.2.1 に示す。図 5.2.1 の上図は 7 電極装置の電極表面を、触針式粗さ計(Surfcot)を用いて測定したものであり、下図は上図に対応した領域での酸化膜厚を示している。

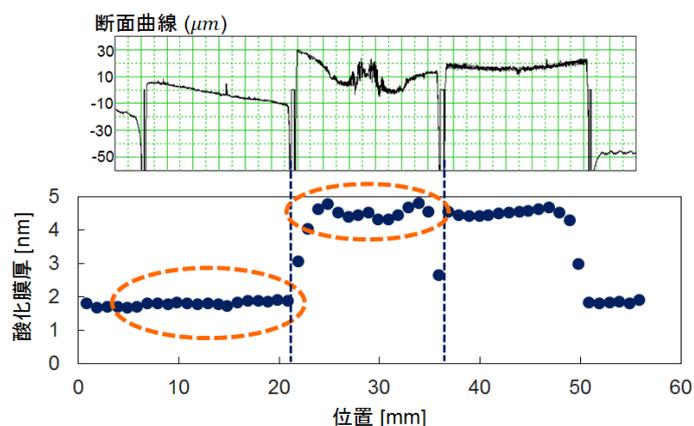


図 5.2.1 電極表面形状と対応する領域の酸化膜厚

表 5.2.1 実験条件

反応ガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
電極－試料間距離	200 μm
投入電力	110 W
酸化時間	3 min

図 5.2.1 上図より左側の電極は残り 2 つの電極と比べ最大 40 μm 程度低くなっていることが分かる。つまり電極－試料間距離が最大で 40 μm 程度広がっており、対応する部分の酸化がほとんど進んでいないことが読み取れる。この結果から多電極型大気圧プラズマ発生装置を用いた数値制御加工を実現するためには、電極表面がマイクロメートルオーダーの高い精度で揃っていることが要求されることが分かる。しかし、7 電極装置の様に個別に作製した電極を高い精度で敷き詰める事は難しく、電極機構の改良が必要と考えられる。

そこで、新たにプリント基板製造技術を転用した薄膜電極を考案した。形状はプラズマの制御機構のサイズを考慮し、対辺間 10 mm の六角形の電極部分を 19 領域分、電極間距離を 300 μm とし敷き詰めたものとした。基板の表裏はスルーホールにより導通が確保されており、裏面のランドに銅リボンを用いて高周波電力を投入する。薄膜電極を図 5.2.2 に、装置構成を図 5.2.3 に示す。

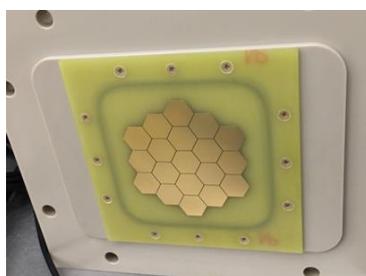


図 5.2.2 薄膜電極（絶縁体板に取り付けた状態）

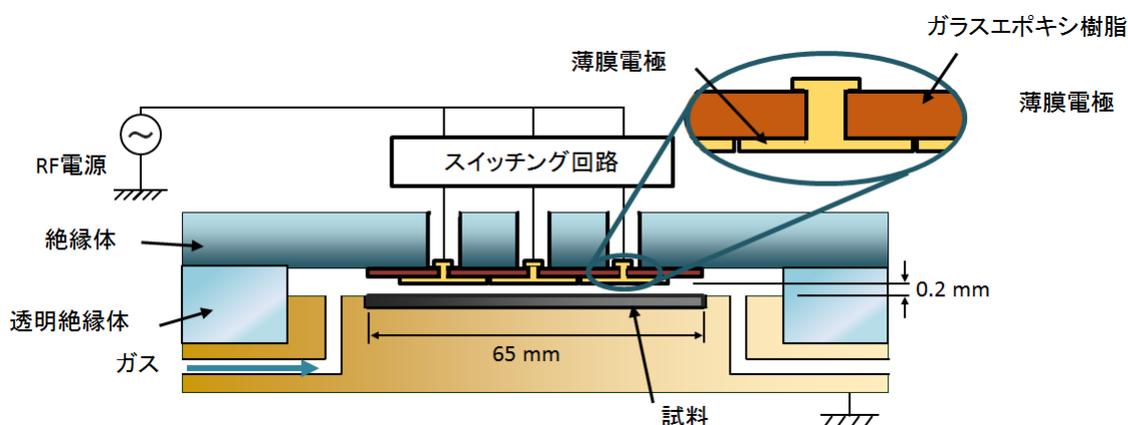


図 5.2.3 薄膜電極を用いる際の装置構成

薄膜電極に対応したプラズマの制御機構として、パワーMOSFETにはSTMicroelectronics社のSTN1NK60Zを2つ、リレーはOMRON社のG6K-2F-Yを使用した。スイッチング回路用プリント基板を図5.2.4、回路図を図5.2.5に示す。装置にはこのプリント基板を5枚設置した。装置の外観を図5.2.6に、装置上部の電極裏面と制御回路の接続部の構造を図5.2.7に示す。

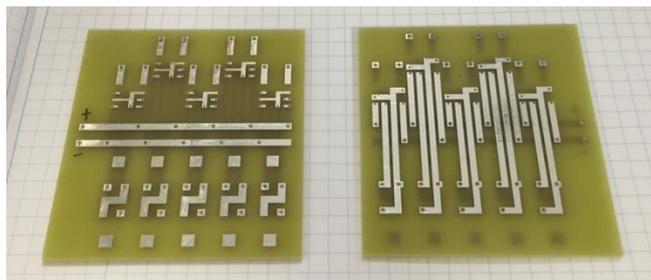


図 5.2.4 スイッチング回路用プリント基板 (左：部品面、右：はんだ面)

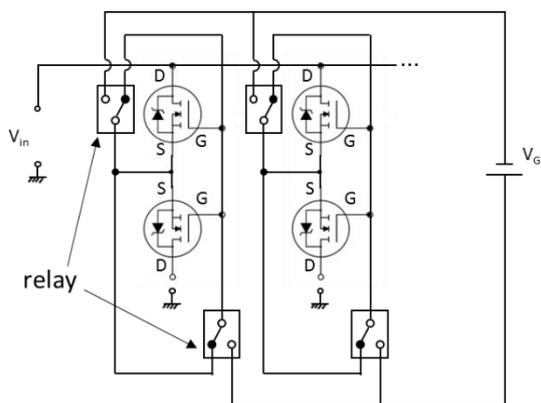


図 5.2.5 スイッチング回路 回路図

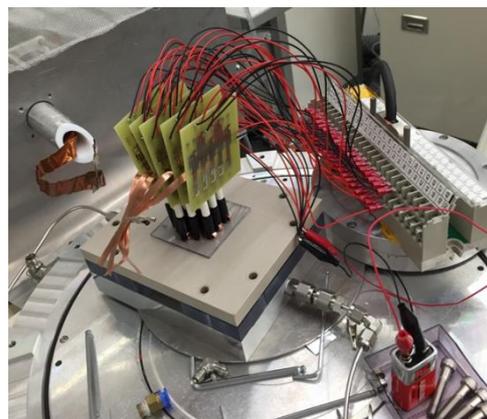


図 5.2.6 スイッチング回路を実装した薄膜多電極装置の外観

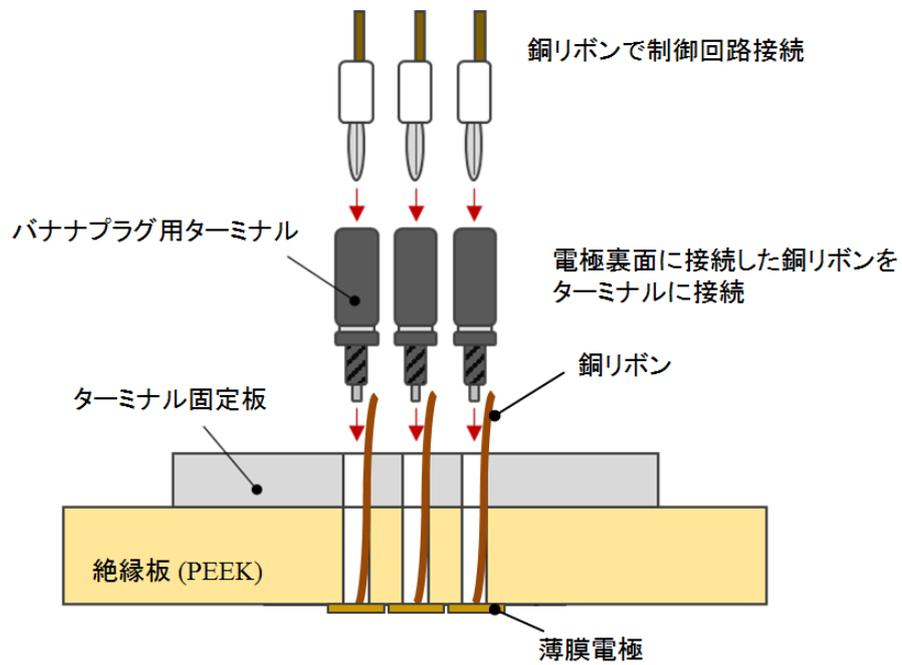


図 5.2.7 電極裏面と装置上部の制御回路との接続部の構造

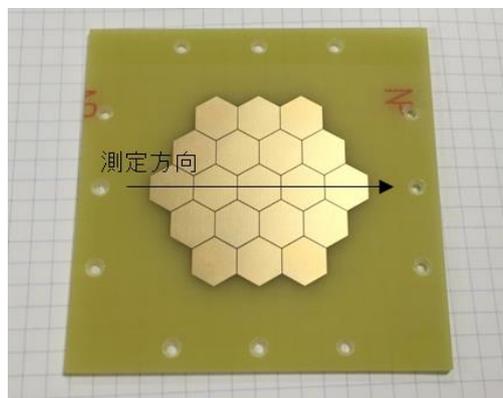
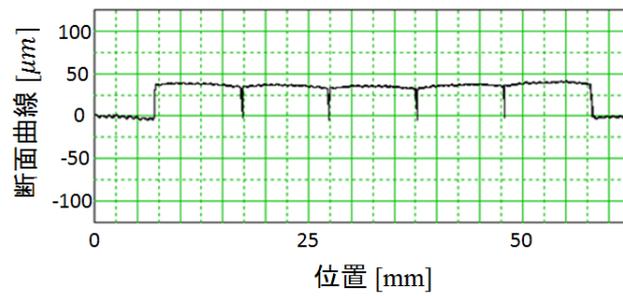


図 5.2.8 薄膜電極の表面形状

各電極表面の高さを触針式粗さ計で測定した結果を図 5.2.8 に示す。電極表面は均一に揃っており、一様な厚さの酸化膜の形成が期待できると考えられる。

以上のように、プリント基板製造技術を転用した薄膜電極を導入することで、均一な電極面を実現した。この薄膜電極は膜厚が約 50 μm となっており、バルク電極は板厚が 2 mm のものを用いていたので、電極間の電気容量はかなり小さくなっている。そのため、バルク電極の際に電極間距離が 300 μm で電極の独立制御が可能であったので、この薄膜電極でも電極間距離が 300 μm であれば確実に独立制御可能であると考えた。独立制御の確認のため、表 5.2.2 に示す条件で任意のパターンで酸化を行う実験を行った。図 5.2.9 に酸化時間分布を、図 5.2.10 に測定した酸化膜厚を示す。各グラフはそれぞれの x 座標において y 軸方向の正の向きに測定したものである。電力を投入していない電極直下においては酸化が進まず、隣接する電極間での容量結合によるプラズマの点灯は起こらず、電極ごとに個別にプラズマを発生できることが確認できた。

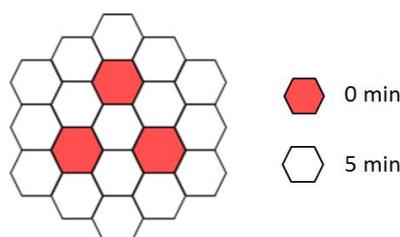


図 5.2.9 酸化時間の分布

表 5.2.2 16 領域酸化における実験条件

反応ガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
電極－試料間距離	220 μm
投入電力	100 W
酸化時間	5 min

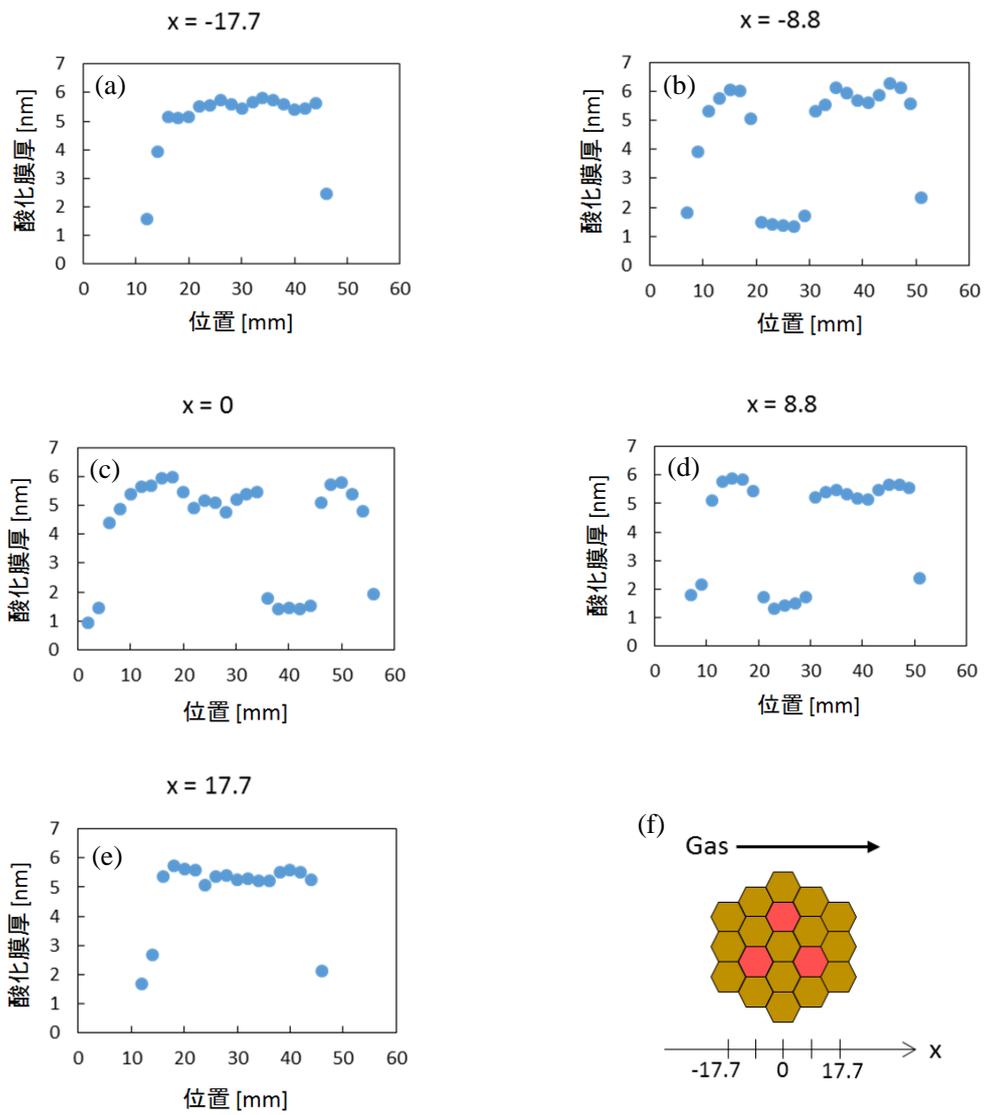


図 5.2.10 異なる位置で測定した酸化膜厚, (a) $x = -17.7$, (b) $x = -8.8$, (c) $x = 0$, (d) $x = 8.8$, (e) $x = 17.7$, (f) 電極の位置関係とガスの流れ

5.3 薄膜電極における酸化膜厚の時間依存性

数値制御酸化のための基礎データとなる各電極の酸化膜厚の時間依存性を調査した。図 5.3.1 に電極番号の対応を、表 5.3.1 に実験条件を示す。また、図 5.3.2 には得られた No.1 電極の酸化膜厚の時間依存性のグラフを示す。

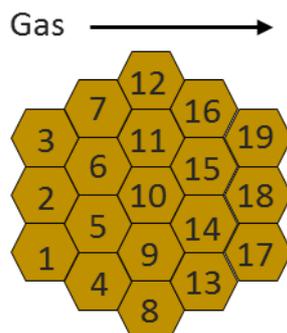


図 5.3.1 作製した薄膜電極装置の電極番号

表 5.3.1 酸化特性調査における実験条件

反応ガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
電極－試料間距離	220 μm
投入電力	130 W
酸化時間	30 sec ~

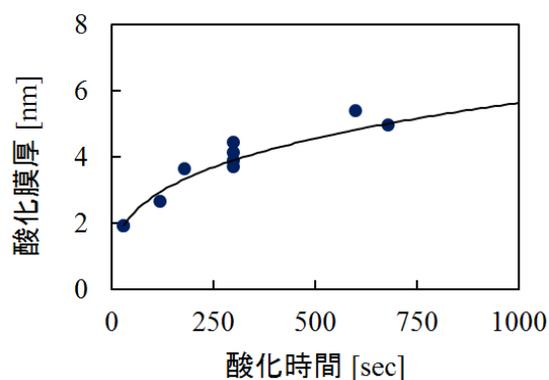


図 5.3.2 No.1 電極の酸化膜厚の時間依存性

Deal ら⁵⁶⁾によると、Si の熱酸化においては、酸化膜厚と酸化時間は以下の関係により整理される。

$$(\text{酸化膜厚}) \propto (\text{酸化時間})^{\frac{1}{2}} \quad (5.3.1)$$

今回、酸化膜厚は各電極領域内の 2 点を測定してその平均値を取り酸化特性を評価し、得られた酸化特性は累乗近似により近似した。酸化速度の近似に頻繁に用いられる Deal-Grove モデルは拡散律速のモデルであり、Deal らは Deal-Grove モデルを発表した論文の中で最長 120 時間のドライ熱酸化を行ったときの酸化膜厚を測定して近似モデルと実験結果を評価している。本章の実験での酸化時間は最長でも十数分であり、すでに拡散律速に移行しているのか、まだ反応律速の段階なのか定かではない。そのため、Deal-Grove モデルを用いた近似はここでは不適と考え、各電極の酸化特性は時間 t として、以下の式のように累乗近似で整理をした。

$$(\text{酸化膜厚}) = At^B \quad (5.3.2)$$

図 5.3.3 より、各電極の酸化特性は、ガスの流れの上流部に位置する電極の酸化速度が大きい傾向があることが分かる。これは上流部の方が積極的にガスが供給されやすいからであると考えられる。このように、各電極において酸化速度が異なるものとし、数値制御加工を行うこととした。また、この結果から得られる P-V 値の改善をどの程度の効率で行うことができるのかを試算した。上記の条件において最も酸化が早く進む領域で 30 sec のみ酸化を行い、最も酸化が遅く進む領域で最後までプラズマを点灯させた場合について計算を行った結果を図 5.3.4 に示す。図 5.3.4 から分かるように、P-V 値 3 nm の解消に 1 時間弱を要するという結果となり、スループットの向上という観点から見ると、さらに改善されなければならないと思われるが、ここに示す結果は表 5.3.1 に示す条件における値であるため、投入電力やプロセスガスの混合比率、電極-試料間距離などを検討することにより改善されることが考えられる。

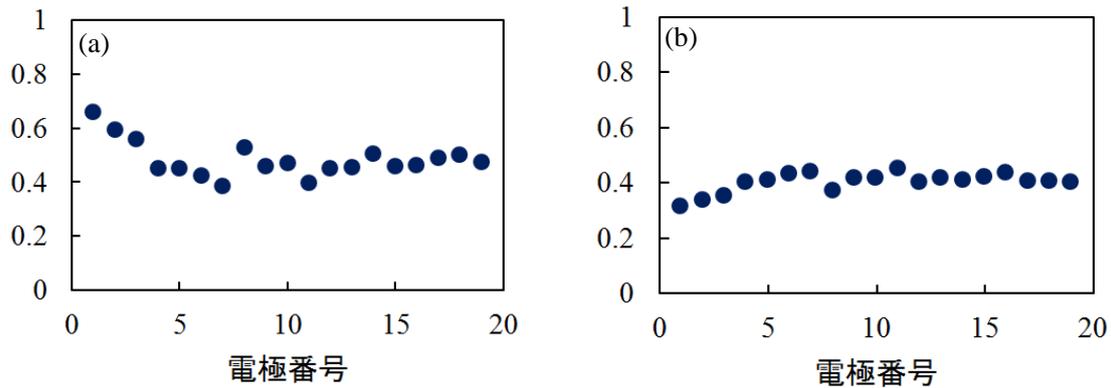


図 5.3.3 (a) 各電極における定数 A の値, (b) B の値

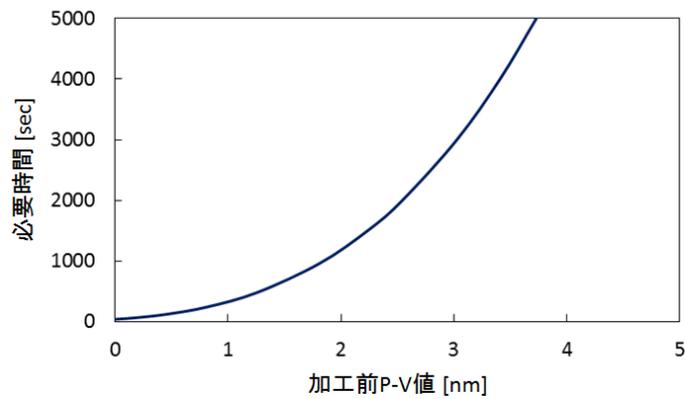


図 5.3.4 加工前 P-V 値とその解消に要する時間の関係

5.4 酸化膜厚に対する Si の加工量割合

本装置において、酸化膜厚に対してどれほどの Si が消費されるのかを調査した。試料として $\phi 8$ インチ SOI ウエハから切り出した基板を用いた。切り出した SOI ウエハはまず硫酸過水洗浄を行い、Chemical Oxide を除去しないまま分光エリプソメトリーにより加工前測定を行った。測定後、フッ酸洗浄により Chemical Oxide を除去し、すぐにプラズマ酸化を行った。その後、試料を再び分光エリプソメトリーで測定した（加工後測定）。実験は計 3 回、全て同様の手順で、酸化時間のみを一部変更して行った。実験条件を表 5.4.1 に示す。

表 5.4.1 Si の消費割合調査における実験条件

反応ガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
電極－試料間距離	220 μ m
投入電力	130 W
酸化時間	5 min (No.1、3) 、 2 min (No.2)

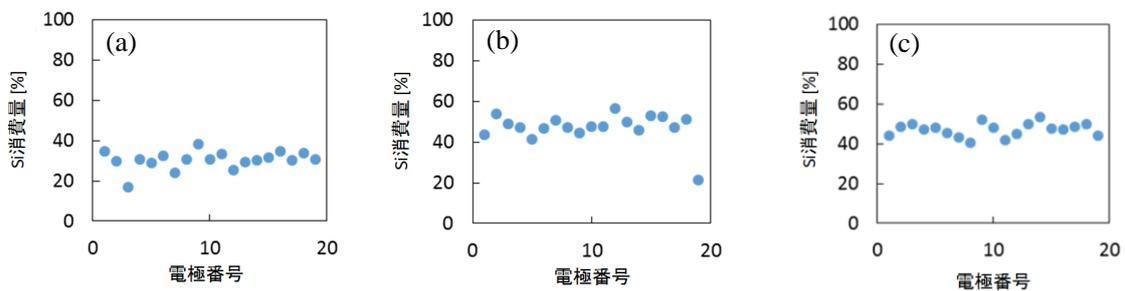


図 5.3.5 Si の加工量割合 (a) No. 1 電極, (b) No. 2 電極, (c) No. 3 電極

各実験において算出した Si の加工量割合を図 5.3.5 に示す。No.1 の結果のみ 30 %前後となっているが、No.2、3 どちらにおいても 45 %程度となっていることから、本装置構成における酸化膜厚に対する Si の消費割合は 45 %とした。上記 3 回の実験において、割合のばらつきが見られた原因としてはエリプソメトリでの測定誤差や、試料を設置する際の測定位置の誤差などが考えられる。

5.5 19 電極領域における数値制御犠牲酸化加工

次に薄膜電極を用いた、19 領域における数値制御犠牲酸化加工について述べる。数値制御犠牲酸化加工前の SOI 層膜厚分布を図 5.5.1 に示す。加工前の評価は分光エリプソメトリーを用いて 19 領域の中心 1 点を測定した。図 5.5.1 に示す加工前の SOI 層膜厚の P-V 値は 2.84 nm であった。

各領域での加工量は最も加工量が少ない領域のプラズマ点灯時間を 30 秒と決定し、それに応じてその他の領域のプラズマ点灯時間も算出したため、各領域の目標加工後膜厚は 223.4 nm となった。これはプラズマ点灯時間が長くなるに従って、目標とする酸化膜厚と実際の酸化膜厚の誤差も大きくなるためである。実験条件を表 5.5.1 に、数値制御犠牲酸化加工後の SOI 層膜厚分布を図 5.5.2 に示す。

表 5.5.1 数値制御加工(1 回目)の実験条件

反応ガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
電極－試料間距離	220 μm
投入電力	130 W
酸化時間	最長 2352 sec

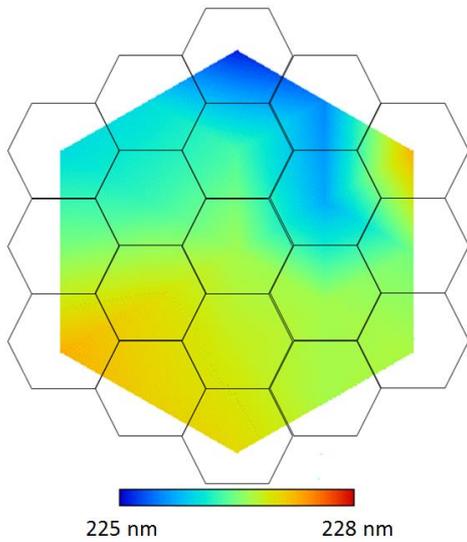


図 5.5.1 加工前の SOI 層膜厚分布

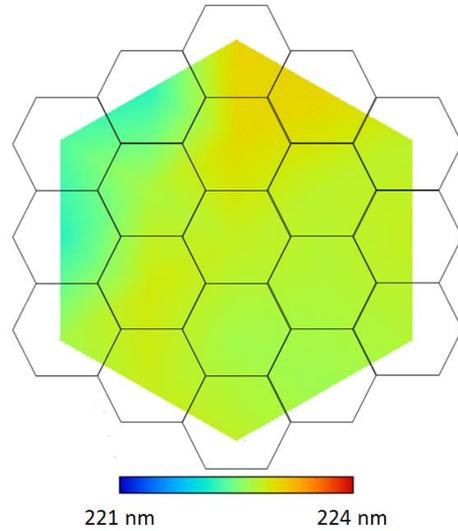


図 5.5.2 加工後の SOI 層膜厚分布

加工後、SOI 層膜厚の P-V 値は 0.86 nm となっており、本方法により高精度な数値制御加工を実現可能であることを実証した。加工精度の考察のため、測定した各領域の加工後 SOI 層膜厚を図 5.5.3 に示す。

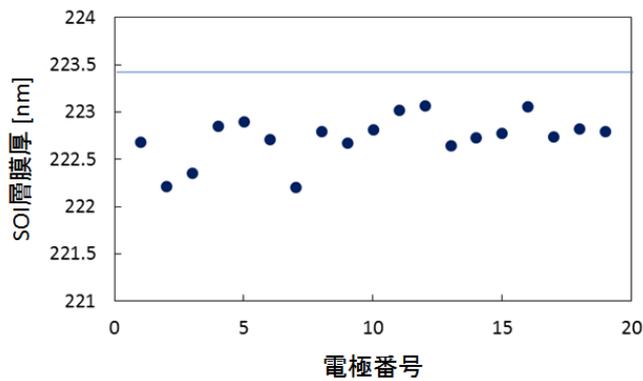


図 5.5.3 加工後 SOI 層膜厚

図 5.5.3 中の実線は目標加工後膜厚を示しているが、どの電極領域においても加工後の SOI 層膜厚が下回っているため、加工量が過多になっていることがわかる。これについて考察するため、図 5.5.4 に目標酸化膜厚と実際の酸化膜厚、目標加工量と実際の加工量を示す。

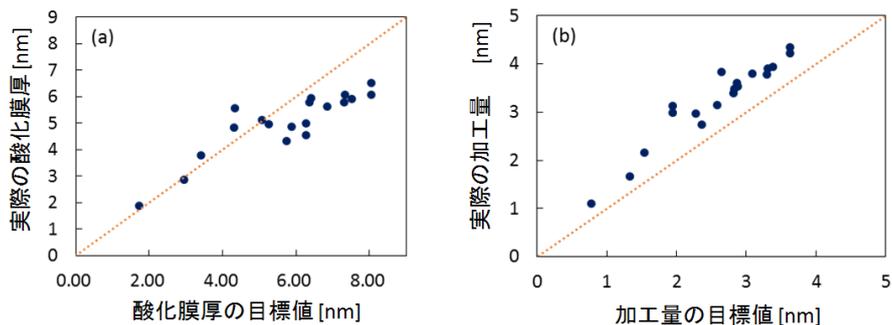


図 5.5.4 加工目標と測定結果の関係 (a) 酸化膜厚 (b) 加工量

図 5.5.4 (a)は目標酸化膜厚と酸化膜厚の測定結果との関係を示している。この結果より、酸化膜厚が 5 nm 未満の領域ではほぼ意図した酸化膜厚が得られているが、5 nm 以上の領域では意図した酸化膜厚に達していない領域があることが分かる。一方で図 5.5.4 (b)は目標加工量と実際の加工量との関係を示しているが、こちらはどの電極領域においても目標加工量を上回っていることが読み取れる。以上の結果をまとめると、意図した酸化膜厚を得られている（もしくは僅かに下回っている）にも関わらず、実際の加工量が目標加工量を超えてしまっているということになる。この誤差は、酸化膜厚に対する Si の消費割合が適切でなかった事が原因であると考えられる。図 5.5.5 に各電極領域における、酸化膜厚に対する Si の消費割合を示す。

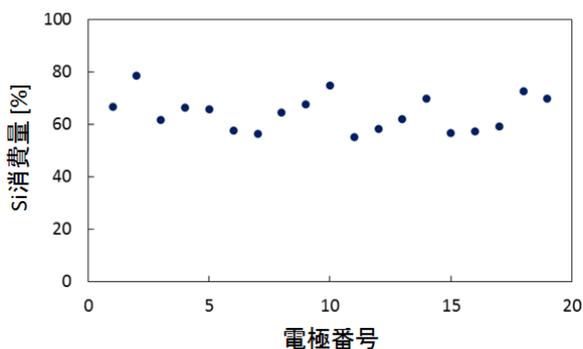


図 5.5.5 各電極における酸化膜厚に対する Si の消費割合

図 5.5.5 から分かるように、加工前に 45 %と設定した Si の消費割合が平均で 64 %と大幅に上回っており、これが目標加工量と実際の加工量に誤差が見られた原因である。

この結果をふまえ、次に Si の消費割合を 64 %として行った。実験条件を表 5.5.2、加工前後の SOI 層膜厚分布を図 5.5.6 に示す。膜厚の測定は先述の試料と同様とした。

表 5.5.2 数値制御加工(2回目)実験条件

反応ガス組成	He : O ₂ = 99 : 1
電極-試料間距離	220 μm
投入電力	130 W
酸化時間	最長 474 sec

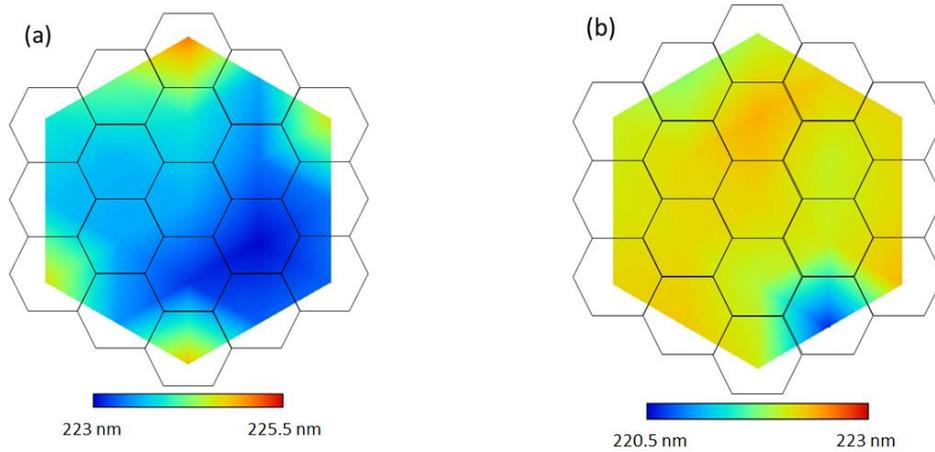


図 5.5.6 加工前後の SOI 層膜厚分布((a): 加工前、(b): 加工後)

図 5.5.6 (a)に示す加工前の SOI 層膜厚 P-V 値は 2.09 nm であり、同図(b)の加工後の SOI 層膜厚 P-V 値は 1.78 nm となったが、No.13 電極直下のプラズマ点灯時間を 59 sec とすべき所を誤って 659 sec としてしまったため、No.13 電極を除いた SOI 層膜厚 P-V 値を考えれば 0.60 nm となる。したがって意図したプラズマの点灯時間制御を行えた領域に限れば P-V 値 0.60 nm を実現する、非常に高精度な Si 薄膜層を実現できたといえる。

先述の実験と同様の考察を行うため、図 5.5.7 に目標酸化膜厚と実際の酸化膜厚、目標加工量と実際の加工量を示す。

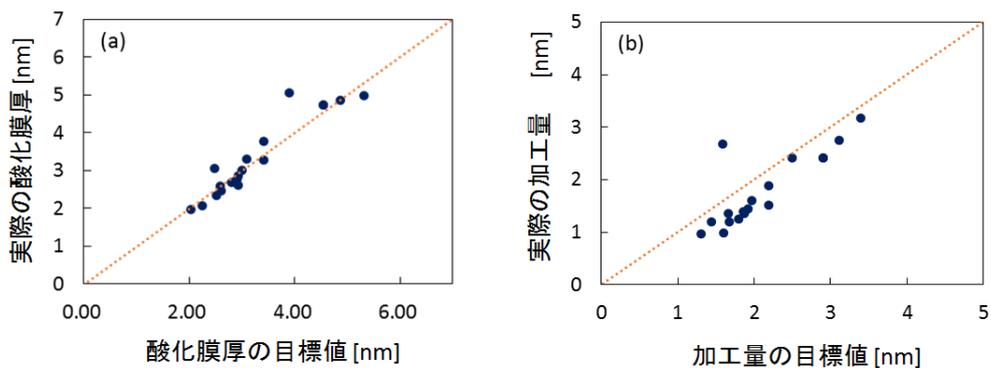


図 5.5.7 加工目標と測定結果の関係((a): 酸化膜厚、(b): 加工量)

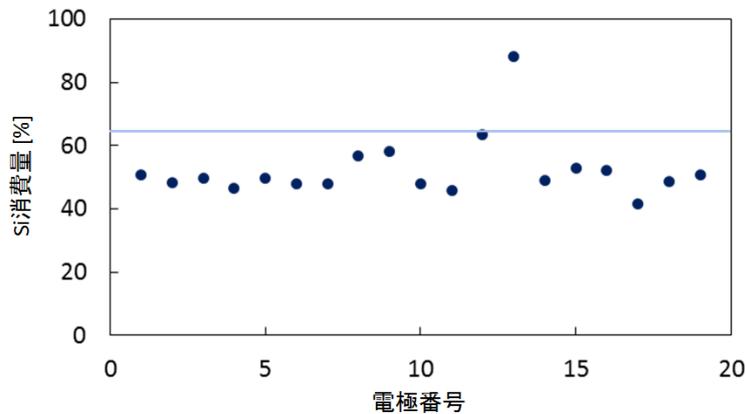


図 5.5.8 各電極における酸化膜厚に対する Si の消費割合

図 5.5.7 (a)は目標酸化膜厚と実際に測定した酸化膜厚の関係を示しているが、どの点においてもほぼ意図した酸化膜厚が得られている。目標酸化膜厚が 3.90 nm の予想から外れている点は先述の酸化時間を誤った箇所である。一方、図 5.5.7 (b)は目標加工量と実際の加工量の関係を示しているが、こちらはほとんどの領域で実際の加工量が、目標とした加工量に達していない。これは、図 5.5.8 に示す酸化膜厚に対する Si の消費割合が想定した 64 %に達していないためであると思われる。

図 5.5.8 から分かるように、Si の消費割合は先述した実験とは異なり平均で 52 %となっていたため、図 6.20(b)のように意図した加工量との誤差が生じたと考えられる。以上 2 回の数値制御加工を通して、膜厚均一性という面では非常に高精度な加工を実現したが、膜厚の絶対値という側面から見れば十分であるとは言えない。特に酸化膜厚に対する Si の消費割合については今後もさらに詳細な検討が必要と考えられる。

5.6 加工後表面の評価

AFM を用いて未加工面と加工後の表面形状を測定し、酸化膜厚と表面粗さの関係を整理した。また、異なる電極電圧による酸化実験を行うことで酸化速度が加工後の表面粗さに与える影響を調査した。

電極電圧 190 V、200 V で Si ウエハを酸化した。酸化膜をフッ化水素酸で除去した後の AFM 像を図 5.6.1 に示す。酸化膜が比較的薄いときは表面形状の様子は未加工面とさほど変わらないが、加工時間が長くなり酸化膜厚が厚くなると表面形状は段々と変化してくることが見て取れる。電極電圧が 190 V と 200 V のときの酸化速度のグラフを図 5.6.2(a)に、酸化膜厚と表面粗さの関係を示すグラフを同図(b)に示す。190 V のときより 200 V のときの方が酸化速度は大きい、200 V のときの方が Rms 値は悪化していることが分かる。加えて、酸化膜厚が厚いときの方が Rms 値は大きい。つまり、これは酸化速度が速ければ速いほど、形成した酸化膜が厚ければ厚いほど、酸化膜除去後の表面粗さは悪化しているといえる。

加工後の表面の荒れはどの程度許容できるかを考慮してから加工条件を決定する必要があると思われる。R. Hasunuma⁵²⁾らは熱酸化時の Si / SiO₂ 界面粗さについて報告しており、文献中⁵²⁾のデータを用いて熱酸化(1000°C)の酸化膜厚と表面粗さの関係を図示したものを図 5.6.3 に示す。同図より、熱酸化においても酸化膜厚が厚くなるほど酸化膜除去後の表面粗さは荒くなり、大気圧プラズマ酸化と同様であることが分かる。また、M. Niwa⁵³⁾らによれば、900°Cでの熱酸化では、酸化による表面の Si / SiO₂ の界面の荒れは加工前の洗浄方法に依存するという。そして、酸化膜厚にかかわらず Rms 値は約 0.15nm に収束すると述べており、その理由は時間が経てば熱酸化中に酸素分子が酸化膜中に均一に分散するからであるとしている。大気圧プラズマ酸化においても酸素ラジカルが酸化膜中を拡散するため、ある値の Rms 値に収束する可能性もあると考えられる。

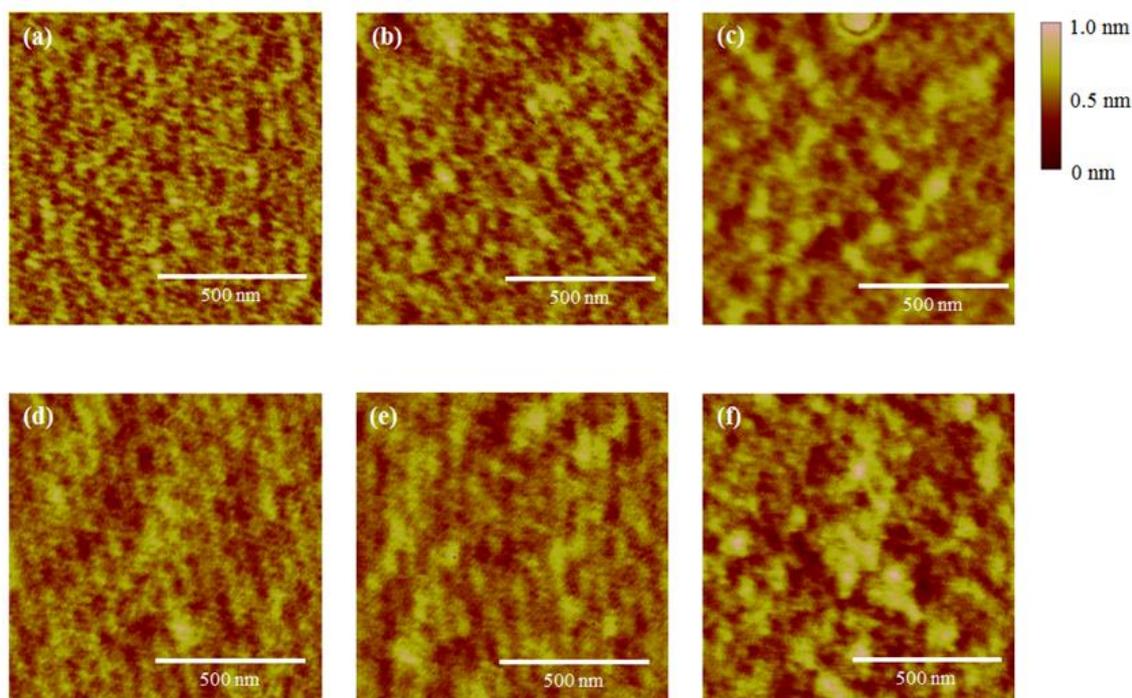


図 5.6.1 試料をフッ化水素酸で洗浄し酸化膜を除去した後の AFM 像 (a)電極電圧：190 V、除去前の酸化膜厚：4.0 nm、(b) 電極電圧：190 V、除去前の酸化膜厚：5.7 nm、(c) 電極電圧：190 V、除去前の酸化膜厚：7.9 nm、(d) 電極電圧：200 V、除去前の酸化膜厚：4.2 nm、(e) 電極電圧：200 V、除去前の酸化膜厚：5.0 nm、(f) 電極電圧：200 V、除去前の酸化膜厚：8.0 nm

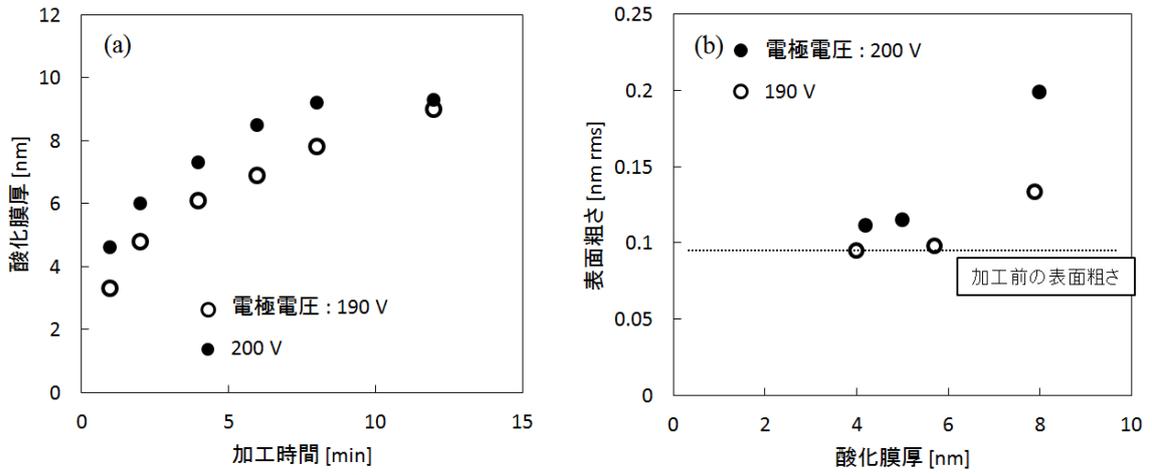


図 5.6.2 (a)電極電圧が 190 V と 200 V のときの酸化時間依存性、(b)電極電圧が異なるときの酸化膜厚と Si / SiO₂ 階面粗さの関係

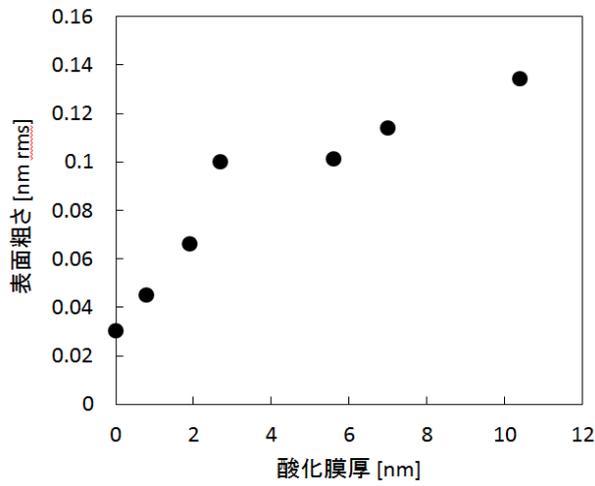


図 5.6.3 熱酸化(1000°C)の酸化膜厚と表面粗さの関係

5.7 結言

本章では、個々の電極の印加電圧を制御する方式の多電極大気プラズマ発生装置において、より高精度で実用的な装置を目指し、個別に作成した電極を組み立てる方式から、薄膜形成とパターンニングを用いて多数の電極を精度よく形成する方式を検討し、19 個の電極を有する装置を試作して、SOI ウエハの数値制御加工実証実験を行った。以下に得られた結果をまとめる。

- 1) プリント基板を作成する技術を応用して、めっき膜を電極材料とする薄膜型多電極を作製した。電極数は 19 個とし、電極形状は対辺長さ 10 mm の六角形とした。作製した電極表面を触針式段差計で測定した結果、各電極の高さはマイクロメートルオーダーで揃っており、個々の電極面内にもマイクロメートルオーダーの凹凸は存在しないことが分かった。
- 2) 全電極でプラズマを発生させて Si 基板の酸化を試みた結果、全面で均一な酸化膜を形成可能であることが分かった。また、任意のパターンで各電極-試料間のプラズマの発生・消滅を制御でき、そのパターンに対応した酸化膜が形成されることを確認した。
- 3) 各電極における酸化速度を調べ、SOI ウエハの Si 層膜厚均一化加工実験を行った。加工前は 2.84 nm であった厚さばらつきを、加工後には 0.84 nm まで改善することに成功し、印加電圧制御型の多電極全面一括型数値制御加工が実現可能であることを実証した。
- 4) 加工後の試料表面をフッ化水素酸で洗浄した後に AFM で観察した結果、酸化速度が高速な条件ほど、また酸化時間が長いほど Si / SiO₂ 界面の粗さは悪化することが分かった。

薄膜電極を用いた印加電圧制御型の多電極全面一括型装置においては、投入可能電力はスイッチング回路に用いる MOSFET の耐電圧に依存することになる。しかし、電極の微小化および電極数の増大が容易であり、かつ数値制御加工装置でありながら機械的な可動部が一切ないため、非常にシンプルかつコンパクトな機構となっている。高分解能化が可能のため、短周期の形状修正加工に適しているといえる。

第6章 総括

本研究では、高精度かつ高能率な決定論的加工法の実現を目指し、加工ヘッドを加工試料全面に走査させるラスタースキャンに代わる手法として、多数の加工ヘッドを加工試料全面に隙間なく敷き詰めて配置し、個々の加工ヘッドの処理時間を個別に制御する全く新しい全面一括型決定論的加工法を提案した。加工ヘッドには大気圧プラズマを用いることとし、多数のプラズマ発生用電極を加工試料に対向させて配置し、個々の電極のプラズマ発生時間を個別に制御することで、全面一括の数値制御加工を実現することを目指した。個々の電極のプラズマを独立に ON/OFF 制御するために、個別に電極試料間ギャップを制御する方式と個別に印加電圧を制御する方式の 2 方式を提案し、それぞれ装置を試作して基礎検討を行った後、数値制御加工の対象として SOI 基板の Si 薄膜層の厚さ均一化を、加工法としては大気圧プラズマ犠牲酸化法を適用して検討を行い、多電極全面一括型の数値制御加工が実現可能であることを実証した結果について、以下のようにまとめている。

第1章では、本研究の背景と目的を述べた。

第2章では、局所的に精密加工が可能な加工ヘッドと送り速度制御が可能な精密 XY テーブルから成る従来のラスタースキャン型「決定論的加工法」について、これまでに開発されてきた種々の加工法の加工原理と実績に関して述べた。そして、本研究で提案する多電極全面一括型「決定論的加工法」のコンセプトを述べ、それを実現するための二つの方式について述べた。以下に本章の要約を述べる。

- 1) ラスタースキャン型決定論的加工法においては、局所的に精密加工が可能な加工ヘッドと送り速度制御が可能な精密 XY テーブルを用い、形状誤差の大きい場所ではテーブルの送り速度を遅くすることで加工ヘッドの滞在時間を長くして加工量を増やし、形状誤差の小さい場所では高速な送りにより滞在時間を短くして加工量を減らしながら、被加工物全面を走査加工することによって、形状誤差を修正するものであることを述べた。
- 2) イオンと試料の弾性衝突、金属酸化物などの微粒子と加工物表面との固体間化学反応、プラズマ中のラジカルと試料表面原子の化学反応、化学反応製液体を試料表面に局所的に吹き付ける液相エッチング等、様々な加工原理に基づく従来の決定論的加工法についてその概要を述べた。
- 3) ラスタースキャン型は、特に被加工物面積が大きい場合や、加工の横方向空間分解能を向上させるため小径の加工ヘッドを用いる場合においては、加工に長時間を要することから、大量生産が必要となる対象には適用困難であることを述べた。

- 4) 多電極全面一括型決定論的加工法のコンセプトについて述べ、それを実現するための具体的な方法として、個々の電極のプラズマを独立に ON/OFF 制御するために、個別に電極試料間距離を制御する方式と個別に印加電圧を制御する方式の 2 方式を提案した。
- 5) 個々の電極の電極試料間ギャップを制御するための、アクチュエータを用いた電極試料間ギャップ制御型の手法について述べた。本機構により、電極と試料との距離が小さい場合はプラズマの発生に十分な電界強度が得られるが、電極が上部に引き上げられ電極試料間ギャップが拡大しているときは電界強度が弱まることでプラズマが消滅すると考えられる。
- 6) 個々の電極の電圧を ON-OFF 制御する電圧制御型の手法について述べた。電極に直接接続したスイッチング素子によって電極に投入される電力の ON-OFF を行い、プラズマの発生と消滅を制御する。

第 3 章では、個々の電極の電極試料間ギャップを制御する方式の多電極プラズマ発生装置を設計製作し、その基本特性を把握するための実験結果および、SOI ウエハを用いた Si 薄膜層の厚さ均一化実験の結果について述べた。以下に本章で得られた結果をまとめる。

- 1) 市販の 300mm SOI ウエハを用いて Si 層膜厚均一加工を行うと仮定した際の、電極サイズと加工後の Si 層膜厚均一性との関係を計算機シミュレーションによって明らかにした。
- 2) 電極形状を対辺間距離 14 mm の六角形とし、φ8 インチウエハの 1/6 の領域を加工領域とした 54 個の電極を有する電極試料間ギャップ制御型の多電極型大気圧プラズマ発生装置を設計・試作した。
- 3) 試作した装置を用いて、Si ウエハを加工対象物として大気圧プラズマ酸化実験を行った。コイルに通電しない状態において全電極-試料間にプラズマが発生し均一な酸化膜が形成されること、任意のパターンで各電極-試料間のプラズマの発生・消滅を制御でき、そのパターンに対応した酸化膜が形成されること、を確認した。
- 4) 形成される酸化膜の膜厚の酸化時間依存性、酸化膜厚に対する Si の消費割合といった酸化特性を調査し、数値制御酸化実験の基礎データを得た。
- 5) φ8 インチ SOI ウエハの 1/6 の領域において、Si 層膜厚均一化加工実験を行った。加工前に 4.53 nm であった厚さのばらつきを、加工後に 1.14 nm にまで改善することに成功し、電極試料間ギャップ制御型の多電極全面一括型数値制御加工が実現可能であることを実証した。

第 4 章では、個々の電極の印加電圧を制御する方式の多電極プラズマ発生装置に関して基礎検討を行った。電極試料間距離制御方式と異なり各電極は互いに絶縁されている必要

があることから電極間距離の検討を行うとともに、印加電圧の ON/OFF 制御を行うためのスイッチング機構について検討した。そして、7 個の電極を有する基礎実験装置を試作して特性を評価した。以下に得られた結果を列挙する。

- 1) 各電極間に形成される浮遊容量によって高周波電力が伝わることから、個々の電極の印加電圧を独立に制御するためには、その浮遊容量を十分小さな値に抑える必要がある。そこで、電極間距離が可変の 2 個の電極を有する大気圧プラズマ発生装置を試作し、個別にプラズマの発生・消滅を制御可能な電極間距離について検討した結果、厚さ 2 mm の電極を用いた際には、300 μm 程度の間隔を設ければ良いことが分かった。
- 2) 電極間隔を 100、200、300 μm として酸化実験を行い電極間部の酸化膜厚について詳細に測定した結果、いずれの距離においても電極間部に酸化されていない領域は見受けられず、連続的なプラズマ処理が可能であることが分かった。
- 3) 電極形状を対辺間距離 14 mm の六角形とする 7 個の電極を有する多電極大気圧プラズマ発生装置を試作しプラズマ酸化実験を行った。安定にプラズマを発生させるには電極と試料間の距離は 200 μm が最適であること、また投入電力は 110 W 前後が最も安定していることが分かった。
- 4) 処理時間を 10~600 秒としてプラズマ酸化実験を行い酸化膜厚の酸化時間依存性を調べた結果、酸化速度は約 100 秒まではほぼ一定であるが、その後は緩やかに減少してゆくことが分かった。酸化速度が減少するのは、酸化膜厚の増加とともにプラズマ中で生成し酸素ラジカルが酸化膜中を拡散する過程が律速過程となるためと考えられる。
- 5) 各電極への印加電圧の ON/OFF 制御のために、パワー MOSFET を 2 個直列に接続する方式を検討し、高周波プラズマの ON-OFF 制御を行うことが可能であることを示した。
- 6) プラズマ発光強度を検出するプローブを作成し、プラズマを OFF する際の応答速度を評価したところ、4 msec 以下であることが分かった。
- 7) MOSFET 内部の寄生容量ため、OFF 時であっても高周波電力はある程度透過すること、およびその寄生容量は MOSFET 中の空乏層の広がりによって変化することから、OFF 時の電力透過率はソースドレイン間電圧にも依存することが分かった。
- 8) 寄生容量の小さい MOSFET を用いることで、OFF 時の透過電力を抑制でき、より大きな電力まで投入可能であることが分かった。また、試作装置用の MOSFET を選定し、周辺回路を含めたプラズマスイッチング用電気回路を構築した。
- 9) プラズマ発生電極数に応じた投入電力制御法について検討した結果、プラズマの発生面積に比例して投入電力を制御するのではなく、電極電圧を一定に保つ制御を行うことで、目標通りの膜厚の酸化膜を得ることが可能であることを示した。
- 10) 7 個全ての酸化膜厚の酸化時間依存性を調べたところ、スイッチング素子である MOSFET の個体差(オン抵抗など)により、多少酸化速度に差があることが分かった。精

密な加工のために、各電極の酸化速度に合わせて酸化時間を設定する必要が有ることが分かった。

- 11) Si 基板を用いて数値制御酸化実験を試みたところ、7 個全ての電極領域において予想される厚さの酸化膜との誤差が 1 nm 以下であることを示した。また、市販 SOI ウェハの Si 層膜厚均一化加工実験を行ったところ、加工前に 1.91 nm であった厚さばらつきを、加工後には 1.08 nm に改善することに成功した。

第 5 章では、個々の電極の印加電圧を制御する方式の多電極大気プラズマ発生装置において、より高精度で実用的な装置を目指し、個別に作成した電極を組み立てる方式から、薄膜形成とパターニングを用いて多数の電極を精度よく形成する方式を検討し、19 個の電極を有する装置を試作して、SOI ウェハの数値制御加工実証実験を行った。以下に得られた結果をまとめる。

- 1) プリント基板を作成する技術を応用して、めっき膜を電極材料とする薄膜型多電極を作製した。電極数は 19 個とし、電極形状は対辺長さ 10 mm の六角形とした。作製した電極表面を触針式段差計で測定した結果、各電極の高さはマイクロメートルオーダーで揃っており、個々の電極面内にもマイクロメートルオーダーの凹凸は存在しないことが分かった。
- 2) 全電極でプラズマを発生させて Si 基板の酸化を試みた結果、全面で均一な酸化膜を形成可能であることが分かった。また、任意のパターンで各電極-試料間のプラズマの発生・消滅を制御でき、そのパターンに対応した酸化膜が形成されることを確認した。
- 3) 各電極における酸化速度を調べ、SOI ウェハの Si 層膜厚均一化加工実験を行った。加工前は 2.84 nm であった厚さばらつきを、加工後には 0.84 nm まで改善することに成功し、印加電圧制御型の多電極全面一括型数値制御加工が実現可能であることを実証した。
- 4) 加工後の試料表面をフッ化水素酸で洗浄した後に AFM で観察した結果、酸化速度が高速な条件ほど、また酸化時間が長いほど Si / SiO₂ 界面の粗さは悪化することが分かった。

第 6 章では、本論文で得られた結果をまとめ、本論文の結論ならびに将来展望に関して述べた。総括すると、本研究によって得られた成果は、次の 3 項目に集約される。

- 1) 電極試料間距離制御型の多電極型大気圧プラズマ発生装置を開発し、数値制御加工による SOI ウェハの Si 層膜厚均一化を行い、多電極型加工の原理実証に成功した。
- 2) 印加電圧制御型の多電極大気圧プラズマ発生装置開発のため、MOSFET を用いた新たなプラズマスイッチング手法の実現と、隣接する電極におけるプラズマの独立制御に必要な電極間距離等を明らかにし、同装置の試作に成功した。
- 3) 将来的な電極数の増加と個々の電極の小型化に対応可能な薄膜型電極を考案し、19 個

の電極を有する装置を試作し、SOI ウェハを用いた Si 層膜厚均一化加工実験において、1 nm 以下の精度の数値制御加工に成功した。

現在、Si ウェハや SOI ウェハ以外にも SiC や GaN など新しい材料が生まれている。多電極型大気圧プラズマ発生装置はそうした新材料の犠牲酸化加工やエッチング加工にも応用可能であり、近い将来、多電極全面一括型加工が様々な分野でその性能を十分に発揮できる日が到来することを願って止まない。

参考文献

- 1) F. W. Preston: *J. Soc. Glass Technol.*, **11**, 214-256 (1927)
- 2) R. Aspden, R. McDonough, and F. R. Nitchie, Jr: *Appl. Opt.*, **11**, 2739-2747 (1972) 根岸真人、安藤学、瀧本雅文、出口明信、中村宣夫: *精密工学会誌*、**62**、408-412 (1996)
- 3) T. Arnold, G. Bohm, R. Fechner, J. Meister, A. Nickel, F. Frost, T. Hansel, and A. Schindler: *Nucl. Instrum. Meth. A*, **616**, 147-156 (2010)
- 4) 石川順三: *荷電粒子ビーム工学*、コロナ社(2001)
- 5) Lynn N. Allen, and Henry W. Romig: *Proc. SPIE*, 1333, 22 (1990)
- 6) F. Frost, R. Fechner, B. Ziberi, D. Flamm, and A. Schindler: *Thin Solid Films* **459**, 100 (2004)
- 7) M. Idir, L. Huang, N. Bouet, K. Kaznatcheev, M. Vescovi, K. Lauer, R. Conley, K. Rennie, J. Kahn, R. Nethery, and L. Zhou: *Rev. Sci. Instrum.* **86**, 105120 (2015)
- 8) S. Germer, F. Pietag, J. Polak, and T. Arnold: *Review of Scientific Instruments*, **87** (11), 113301 (2016)
- 9) T. Arnold, and F. Pietag: *Precision Engineering*, **41**, 119-125 (2015)
- 10) M. Aeuner, H. Neumann, F. Scholze, D. Flamm, M. Tartz, and F. Bigl: *Plasma Sources Science and Technology*, **7** (3), 252-267 (1998)
- 11) G. Aston, H. R. Kaufman, and P. J. Wilbur: *Physics in Medicine and Biology*, **47** (8), R85-R106 (2002)
- 12) T. Arnold, G. Bohm, R. Fechner, J. Meister, A. Nickel, F. Frost, T. Hansel, and A. Schindler: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A*, **616** (2-3) 147-156 (2010)
- 13) Y. mori, K. Yamauchi, and K. Endo: *Precision Engineering*, **9**, 123-128 (1987)
- 14) H. Tsuwa and Y. Aketa: *Proc. International Conference on Production Engineering Tokyo*, **2**, 33 (1974)
- 15) Y. Mori, N. Ikawa and K. Sugiyama: *Technol. Repts., Osaka Univ.* **28**, 525 (1978)
- 16) H. Tsuwa, N. Ikawa, Y. Mori and K. Sugiyama: *Annals of the CIRP* **28**, 193 (1979).
- 17) Y. Mori, K. Yamauchi and K. Endo: *Precision engineering* **10**, 24-28 (1988)
- 18) K. Yamauchi, K. Hirose, H. Goto, K. Sugiyama, K. Inagaki, K. Yamamura, Y. Sano, and Y. Mori: *Computational Materials Science* **14**, 232 (1999)
- 19) K. Inagaki, K. Yamauchi, H. Mimura, K. Sugiyama, K. Hirose and Y. Mori: *Mater. Trans.* **42**, 11 (2001)
- 20) S. Matsuyama, N. Kidani, H. Mimura, J. Kim, Y. Sano, K. Tamasaku, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi: *Proceedings of SPIE*, **8139**, 813905 (2011)
- 21) Y. Mori, K. Yamauchi, K. Endo, T. Ide, H. Toyota, K. Nishizawa, and M. Hasegawa: *J. Vac. Sci. Technol. A* **8**, 621 (1990)
- 22) T. Ichiki, R. Taura, and Y. Horiike: *Journal of Applied Physics*, **95**, 35-39 (2004)

- 23) A. Schindler, G. Boehm, T. Haensel, W. Frank, A. Nickel, A. Rauschenbach, and F. Bigl: *Proceedings of SPIE*, **4451**, 242-248 (2001)
- 24) J. Meister, and T. Arnold: *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, **31**, 91-107 (2011)
- 25) F. Stowers, R. Komanduri, and E. D. Baird: *Proceedings of SPIE*, **966**, 62-73 (1989)
- 26) H. Paetzelt, T. Arnold, G. Bohm, F. Peitag, and A. Schindler: *Plasma Processes and Polymers*, **10**, 416-421 (2013)
- 27) T. Arnold, and G. Bohm: *Precision Engineering*, **36**, 546-553 (2012)
- 28) J. Meister, G. Bohm, I. M. Eichertopf, and T. Arnold: *Plasma Processes and Polymers*, **6**, S209-S213 (2009)
- 29) H. Paetzelt, G. Bohm, and T. Arnold: *Plasma Sources Science and Technology*, **24**, 025002 (2015)
- 30) N. Li, Q. Xin, P. Zhang, and B. Wang: *Plasma Science and Technology*, **17** (7) 567-573 (2015)
- 31) T. Arnold, G. Bohm, and H. Paetzelt: *Contributions to Plasma Physics*, **54** (2), 145-154 (2014)
- 32) M. Janietz, and T. Arnold: *Surface and Coatings Technology*: 205, S351-S354 (2011)
- 33) A. M. Bilgic, U. Engel, E. Vogest, M. Kuckelheim, and J. A. C. Broekaert: *Plasma Sources Science and Technology*, **9** (1), 1-4 (2000)
- 34) L. Bardos, S. Berg, H. -O. Blom, and A. M. Barklund: *Journal of the Electrochemical Society*, **137** (5), 1587-1591 (1990)
- 35) T. Arnold, G. Boehm, I. Eichertopf, M. Janietz, J. Meister, and A. Schindler: *Vakuum in Forschung und Praxis*, **22**, 10-16 (2010)
- 36) K. Yamamura: *CIRP Annals*, **56**, 541-544 (2007)
- 37) K. Yamamura, M. Nagano, H. Takai, N. Zettsu, D. Yamazaki, R. Maruyama, K. Soyama, and S. Shimada: *Optics Express*, **17**, 6414-6420 (2009)
- 38) M.C. Rushford, J.A. Britten, S.N. Dixit, C.R. Hoaglan, M.D. Aasen, L.J. Summers: *Applied Optics*, **42**, 5706-5713 (2003)
- 39) M. Nagano, F. Yamaga, N. Zettsu, D. Yamazaki, R. Murayama, K. Soyama, and K. Yamamura: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A*, **634**, S112-S116 (2011)
- 40) K. Yamamura: *Science and Technology of Advanced Materials*, **8**, 158-161 (2007)
- 41) 八田吉典 : 気体放電、近代科学社 (1968)
- 42) 日本化学会編 : 化学便覧 基礎編、丸善 (2004)
- 43) 電気学会編 : 放電ハンドブック、電気学会 (1998)
- 44) Y. Mori, K. Yamauchi, K. Yamamura, and Y. Sano: *Review of Scientific Instruments*, **71** (12), 4627-4632 (2000)
- 45) K. Yamamura, K. Yamauchi, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Endo, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa, and Y. Mori: *Review of Scientific Instruments*, **74** (10), 4549-4553 (2003)

- 46) 佐野泰久：プラズマ CVM (Chemical Vaporization Machining) による超精密加工に関する研究 -超薄膜 SOI (Silicon on Insulator) ウエハの製作-、大阪大学学位論文 (2002)
- 47) Y. Mori, K. Yamamura, K. Yamauchi, K. Yoshii, T. Kataoka, K. Endo, K. Inagaki, and H. Kakiuchi: *Nanotechnology*, 4 (4), 008, 225-229 (1993)
- 48) H. Takino, N. Shibata, H. Itoh, T. Kobayashi, H. Tanaka, M. Ebi, K. Yamamura, Y. Sano, Y. Mori: *Applied Optics*, 41, 3971-3977 (2002)
- 49) M. Shibahara, K. Yamamura, Y. Sano, T. Sugiyama, K. Endo, Y. Mori: *Review of Scientific Instruments*, 76, 096103-1-4 (2005)
- 50) 後藤英和：熱化学反応加工に関する基礎的研究、大阪大学学位論文 (1989)
- 51) Yasuhisa Sano, Kazuya Yamamura, Hidekazu Mimura, Kazuto Yamauchi, and Yuzo Mori: *Review of Scientific Instruments*, **78**, 8, 086102 (2007)
- 52) Y. Sano, T. Masuda, S. Kamisaka, H. Mimura, S. Matsuyama, and K. Yamauchi: IEEE Int. SOI Conf. 165-166 (2008)
- 53) H. Takei, K. Yoshinaga, K. Matsuyama, S. Yamauchi, and Y. Sano: *Jpn. J. Appl. Phys.*, 54, 01AE03 (2015)
- 54) R. Hasunuma, Y. Hayashi, M. Ota, and K. Yamabe: *Jpn. J. Appl. Phys.*, 52, 031301 (2013)
- 55) M. Niwa, T. Kouzaki, K. Okada, M. Udagawa, and R. Sinclair: *Jpn. J. Appl. Phys.*, 33, 388 (1994)
- 56) B. E. Deal, and A. S. Grove: *Journal of Applied Physics*, **36**, 12, 3770-3778 (1965)

研究業績

【主たる論文】

- [1] H. Takei, S. Kurio, S. Matsuyama, K. Yamauchi, and Y. Sano, “Change in Surface Morphology of Si (100) Wafer after Oxidation with Atmospheric-Pressure Plasma”, *Key Engineering Materials*, **723**, 242-246 (2017)
- [2] H. Takei, S. Kurio, S. Matsuyama, K. Yamauchi, and Y. Sano, “Development of array-type atmospheric-pressure RF plasma generator with electric on–off control for high-throughput numerically controlled processes”, *Review of Scientific Instruments*, **87**, 10, 105121 (2016)
- [3] H. Takei, K. Yoshinaga, S. Matsuyama, K. Yamauchi, and Y. Sano, “Numerically controlled atmospheric-pressure plasma sacrificial oxidation using electrode arrays for improving silicon-on-insulator layer uniformity”, *Japanese Journal of Applied Physics*, **54** (1S), 01AE03 (2015)

【国際会議発表（筆頭著書）】

- [1] H. Takei, S. Kurio, S. Matsuyama, K. Yamauchi, and Y. Sano, “The Oxidation Characteristic in Numerically Controlled Sacrificial Oxidation with Atmospheric-Pressure Plasma”, 2015 Asian-European International Conference on Plasma Surface Engineering, Oral presentation, Jeju, Korea (2015)
- [2] H. Takei, S. Kurio, S. Matsuyama, K. Yamauchi, and Y. Sano, “Power Control Method for Atmospheric-Pressure Plasma Generator with Electrode Array”, 9th International Conference on Reactive Plasmas, Oral presentation, Hawaii, USA (2015)
- [3] H. Takei, S. Kurio, Y. Sano, S. Matsuyama, and K. Yamauchi, “Improving the Accuracy of Numerically Controlled Sacrificial Plasma Oxidation Using an Array of Electrodes to Produce Ultra-Uniform SOI”, 15th International Conference on Precision Engineering, Oral presentation, Kanazawa, Japan (2014)
- [4] H. Takei, K. Yoshinaga, Y. Sano, S. Matsuyama, and K. Yamauchi, “Numerically Controlled Sacrificial Atmospheric-Pressure Plasma Oxidation Using Electrode Arrays to Improve SOI Layer Uniformity”, 8th International Conference on Reactive Plasmas, 31st Symposium on Plasma Processing, Poster presentation, Fukuoka, Japan (2014)

- [5] H. Takei, K. Yoshinaga, Y. Sano , S. Matsuyama, and K. Yamauchi, “Improving the Accuracy of Numerically Controlled Sacrificial Plasma Oxidation to Improve the Thickness Uniformity of SOI”, 2012 IEEE International SOI Conference, Poster presentation, California, USA (2012)
- [6] H. Takei, K. Yoshinaga, Y. Sano , S. Matsuyama, and K. Yamauchi, “Improving Processing Accuracy of Numerically Controlled Sacrificial Plasma Oxidation Using Array of Electrodes to Produce Ultra-uniform SOI”, 5th International Symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology, Poster presentation, Osaka, Japan (2012)

【国際会議発表（筆頭以外）】

- [1] Yasuhisa Sano, Hiroyasu Takei, Satoshi Matsuyama, and Kazuto Yamauchi, “Thickness uniformization of the silicon layer in a silicon-on-insulator wafer by a numerically controlled plasma process using an array-type electrode”, The 7th International Symposium on Advanced Science and Technology of Silicon Materials, Hawaii, USA (2016)

【国内会議発表（筆頭著書）】

- [1] 武居弘泰, 栗生賢, 松山智至, 山内和人, 佐野泰久, ”大気圧プラズマによる Si の酸化特性”, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 口頭形式, 東北大学 (2015)
- [2] 武居弘泰, 栗生賢, 松山智至, 山内和人, 佐野泰久, ”多電極型大気圧プラズマ発生装置を用いた数値制御犠牲酸化法の開発 –Development of Numerically Controlled Sacrificial Oxidation with Atmospheric Pressure Plasma Generator Using Array-Type Electrode”, 第 75 回応用物理学会学術講演会, 口頭形式, 北海道大学 (2014)
- [3] 武居弘泰, 吉永圭之介, 佐野泰久, 松山智至, 山内和人, ”数値制御大気圧プラズマ犠牲酸化法による膜厚均一化加工法の精度向上”, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 口頭形式, 関西大学, (2013)
- [4] 武居弘泰, 吉永圭之介, 佐野泰久, 松山智至, 山内和人, ”多電極型大気圧プラズマ発生装置を用いた数値制御犠牲酸化法による SOI ウェハ Si 層の厚さ均一化加工の精度向上”, 2012 年度精密工学会関西地方学術講演会, ポスター形式, 立命館大学 (2012)
- [5] 武居弘泰, 吉永圭之介, 佐野泰久, 松山智至, 山内和人, ”数値制御大気圧プラズマ犠牲酸化法による SOI ウェハ Si 層膜厚均一化 多電極型プラズマ発生装置の試作と評価-Uniformizing Si Layer Thickness of SOI wafer by Numerically Controlled Sacrificial Plasma Oxidation Using Array-Type Electrode”, 第 59 回応用物理学会学術講演会, 口頭形式, 早稲田大学 (2012)

【国内会議発表（筆頭以外）】

- [1] 栗生賢，武居弘泰，佐野泰久，松山智至，山内和人，”数値制御大気圧プラズマ犠牲酸化法における酸化膜厚制御の精度向上”，2015年度精密工学会秋季大会学術講演会，口頭形式，東北大学（2015）
- [2] 栗生賢，武居弘泰，佐野泰久，松山智至，山内和人，”高能率数値制御犠牲酸化のための多電極型大気圧プラズマ発生装置の開発”，2014年度精密工学会秋季大会学術講演会，口頭形式，鳥取大学（2014）
- [3] 栗生賢，武居弘泰，佐野泰久，松山智至，山内和人，”高能率数値制御犠牲酸化のための多電極型大気圧プラズマ発生装置の開発”，2014年度精密工学会関西地方学術講演会，口頭形式，近畿大学（2014）

【受賞歴】

- [1] 精密工学会関西支部 2012年度関西地方定期学術講演会 ベストポスタープレゼンテーション賞

【特許】

- [1] 特願 2014-176601，”プラズマ処理装置”，出願人：国立大学法人大阪大学，発明者：佐野泰久，武居弘泰，栗生賢

謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始御指導、御鞭撻を賜りました大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻 山内和人教授に深甚なる謝意を表します。また、本論文をまとめるにあたり、その内容について終始御検討いただくとともに、懇篤なる御校閲ならびに適切なる御教示を賜りました大阪大学 大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻 佐野泰久准教授に厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行する過程において、適切な御助言を頂きました大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻 高橋幸生准教授、松山智至助教に心から謝意を表します。また、数々の御教示を頂きました大阪大学大学院工学研究科 安武潔教授、森田瑞穂教授、桑原裕司教授、森川良忠教授、渡部平司教授、遠藤勝義教授に深甚の謝意を表しますとともに多くの御指導、御助言を賜りました精密科学教室の諸先生方に深く感謝致します。さらに、研究活動を行う上で多大なるご支援をいただきました、久保英里子秘書、寺井嘉奈子秘書に深く謝意を表します。そして、日頃の研究活動の遂行にあたり、終始惜しみない御協力を頂きました吉永圭之介氏、栗生賢氏、岡山晨哉氏をはじめとする山内研究室の諸兄諸氏に厚くお礼申し上げます。

本研究の一部は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム研究拠点形成費補助金(研究拠点形成費)、科学研究費補助金(萌芽研究 19656040)、独立行政法人科学技術振興機構研究成果展開事業研究成果最適展開支援プログラム(育成研究)、日本学術振興会特別研究員奨励費(27-581)、文部科学省博士課程教育リーディングプログラム独創的教育研究活動経費を受けて行われました。ここに深く感謝いたします。

最後に、大学における日々の研究活動において両親と恋人、ならびに友人の終始変わらぬ暖かい励ましと支えがあったことを記し、ここに感謝の意を表します。

平成 29 年 1 月

大阪大学大学院工学研究科 精密科学・応用物理学専攻

武居弘泰

