

# 電子工学科 実験報告書

---

実験題目： MOS 構造の作製と特性評価  
担当教員： 西 敬生 教授  
実験開始日： 令和 5 年 6 月 15 日  
実験終了日： 令和 5 年 6 月 22 日  
提出日： 令和 5 年 6 月 27 日  
再提出日：

学年： 5 年  
出席番号： 12  
実験班： B 班  
氏名： 河合 将暉

共同実験者名：

---

コメント欄

## 1 目的

トランジスタ製作の基本技術の習得と MOS トランジスタの基本特性である MOS 容量の電圧依存性, 周波数特性および酸化膜厚の酸化時間依存性について学ぶ.

## 2 解説

### 2.1 MOS 構造

MOS とは Metal(金属) - Oxid(酸化膜) - Semiconductor(半導体) の頭文字の略称である. 半導体 Si の表面を酸化させ, 絶縁体酸化膜  $\text{SiO}_2$  が形成される. この上に金属電極を積むことで図 1 の MOS 構造が形成される.

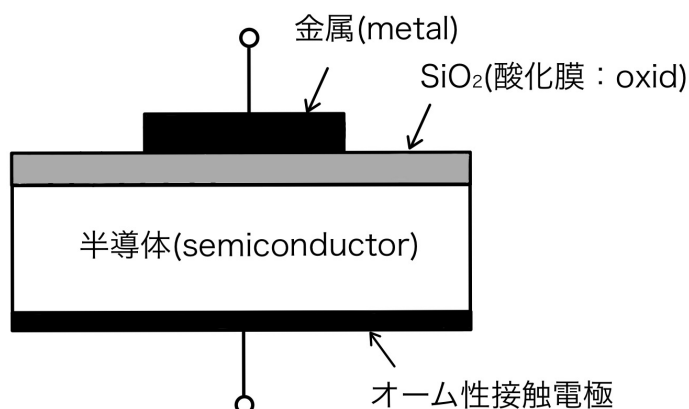


図 1: MOS 構造図

### 2.2 作製過程

#### 1) ウェーハ洗浄

Si ウェーハの表面は一度パッケージから出してしまうと, たとえクリーンルーム内といえども, 多かれ少なかれ汚染される. 本校クリーンルームはクラス 10000 (1 立方フィート内に  $0.5\mu\text{m}$  の粒子が 1 万粒) とされ, 専門家ではない学生が扱うことを考えれば, ウェーハを扱う企業の現場 (クラス 1~100) より非常に汚染されやすい環境にある. 具体的にウェーハ表面を汚染するものや除去したいものとしては

- (a) パーティクル
- (b) アルカリ金属, 重金属
- (c) 有機物
- (d) Si 自然酸化膜

以上が挙げられる. ここでのパーティクルとは, 材質などは問わずに, 粒形が数百 nm 以上のものの総称である.

これらをウェーハ表面に物理的・科学的にダメージを与えることなく, 除去する洗浄方法が必要とされており, RCA 法など, 多くの方法が提案されている.

## 2) 酸化膜形成

Siの酸化膜はウェーハを、酸素を満たした 900～1200° の高温の炉中に入れ熱酸化によって形成されることが多い。満たす酸素の供給源としては、乾燥した純粋な酸素 O<sub>2</sub> を送り込むドライ酸化と、水蒸気または水素と酸素の混合気を送り込むウェット（水蒸気またはスチームなどともいう）酸化がある。

酸化のメカニズムは、

- (a) 酸化種 (O<sub>2</sub> または H<sub>2</sub>O) が表面で反応もしくは SiO<sub>2</sub> に吸着される。
- (b) 吸着された O<sub>2</sub> または H<sub>2</sub>O が酸化膜 SiO<sub>2</sub> の中を拡散してシリコンの界面に達する。
- (c) シリコンとの界面でシリコンと反応して SiO<sub>2</sub> になる。

といった段階を経る。酸化速度は酸化膜 SiO<sub>2</sub> が薄い時には 3 の化学反応の速度で決まり、厚い時には 2 の拡散する速度によって決まる。前者の状況を反応律速、後者を供給律速という。

全体の反応を式で表すと

$$T_{OX}^2 + AT_{OX} = B(t + \tau_0) \quad (1)$$

となり、ここで A,B は温度と酸化条件で決まる定数、 $\tau_0$  は初期の酸化膜厚に対応する定数である。酸化時間 t が長くて、 $T_{OX}$  が厚いときには

$$T_{OX}^2 \simeq (B/A)(t + \tau_0) \quad (2)$$

となる。これらの酸化定数を表 1 に示す。

表 1: シリコンのドライ酸化時の酸化定数

酸化温度 T [°C]	A[ $\mu\text{m}$ ]	B[ $\mu\text{m}^2/\text{h}$ ]	$\tau_0[\text{h}]$
1200	0.040	0.045	0.027
1100	0.090	0.027	0.076
1000	0.165	0.0117	0.37
920	0.235	0.0049	1.40
800	0.370	0.0011	9.0

## 3) フォトリソグラフィ IC 製造において各種材料膜を所望の形状加工にするため、パターニングを施すことをフォトリソグラフィと呼ぶ。この工程は通常の写真技術の応用であり、以下の手順を踏む。

- (a) レジスト塗布 (感光剤塗布)：ウェーハ上にフォトリソという感光性樹脂をコーティング
- (b) 露光：平面的パターンが書かれたマスクを通し、光を照射して、パターンをレジストに転写
- (c) レジスト部分除去：レジストの化学反応により変質した部分を除去することでマスクパターンと同じレジストパターンが形成される。
- (d) 加工：部分的なレジストの除去により、レジストの下層が一部分、表出。その表出部分をエッチングしたり、上から蒸着や塗布などを行ったりすることで、パターンと同じ構造を形成できる。

## レジスト

レジストには光が当たった部分が残るネガ型と、光が当たった部分が解けて取れるポジ型があり、本実験ではポジ型の OFPR という商品名で、光が当たるとアルカリ溶液に可溶性となる。レジストの塗布にはスピナー（スピンコーター）と呼ばれる塗布機を用いる。これはウェーハにレジストを滴下後高速回転させることで一定の膜厚のレジストのコーティングを可能とする。

## 露光

マスク粗いなどと呼ばれる。マスク接触型の露光装置で行われる。光学ステージへのセットは自動で行われる。露光の高原には高圧水銀ランプから発せられる紫外線 (i 線, 波長  $\lambda = 365\text{nm}$ )

### 4) フォトリソグラフィ

IC 製造において各材料膜を所望の形状に加工するため、パターニングを施すことをフォトリソグラフィと呼ぶ。この工程は通常の写真技術の応用であり、以下の手順を踏む。

#### (a) レジスト塗布 (感光剤塗布)

ウェーハ上にフォトレジストという感光性樹脂をコーティング

#### (b) 露光

平均的パターンが描かれたマスクを通し、光を照射して、パターンをレジストに転写

#### (c) レジスト部分除去

レジストの光化学反応により変質した部分を除去することで、マスクパターンと同じレジストパターンが形成される。

#### (d) 加工

部分的なレジストの除去により、レジストの下層が一部分表出する。その表出部分をエッチングしたり、上から蒸着や塗布を行うことで、パターンと同じ構造を形成できる。

## 2.3 MOS 構造の電気的特性

### 1) 電圧印加による 3 つの状態

MOS 構造は、図 2 のように印加電圧によって電氣的に 3 つの状態に変化する。

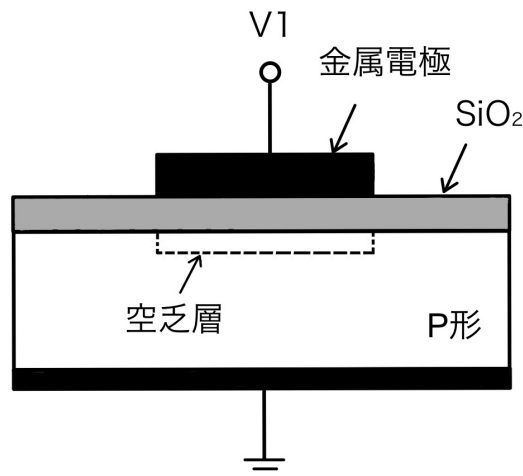


図 2: 空乏状態の MOS 構造

図 2 はプラスの電圧  $V_1$  を印加した状態で、酸化膜を挟んで電極下の半導体の部分に電子が引き寄せられ、多数キャリアの正孔と引き寄せられた電子が再結合し、キャリアの存在しない空乏層と呼ばれる領域が生じる。これを空乏状態という。 $V_1$  より大きな電圧を印加するとより

多く電子が引き寄せられ、酸化膜－半導体界面のごく薄い部分だけ P 形から N 形に“反転”する。これを図 3 のように反転層といい、反転状態と呼ぶ。

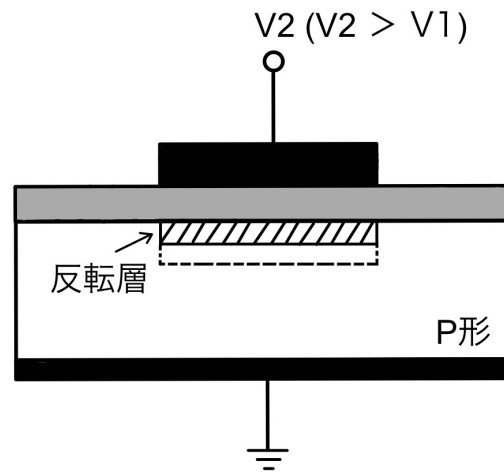


図 3: 反転状態の MOS 構造

このように MOS 構造では、半導体の伝導型を電圧によって変化させることができる。MOS トランジスタはこれを利用している。図 4 は蓄積状態と呼ばれ、 $-V_3$  を印加すると正孔を引き寄せ、その部分の抵抗率が下げられる。

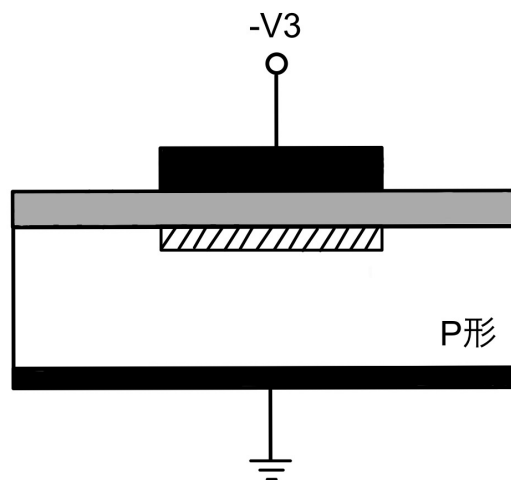


図 4: 蓄積状態の MOS 構造

## 2) 電圧－容量特性

MOS 構造は金属で絶縁体をサンドイッチしていると考えるとコンデンサの一種と見ることもできる。空乏層という絶縁層を生じさせ、印加電圧によって空乏層幅を変化させられるため、静電容量も変えることができる。図 5 は MOS 構造の  $C - V$  特性で周波数によって特性が図のように変化する。

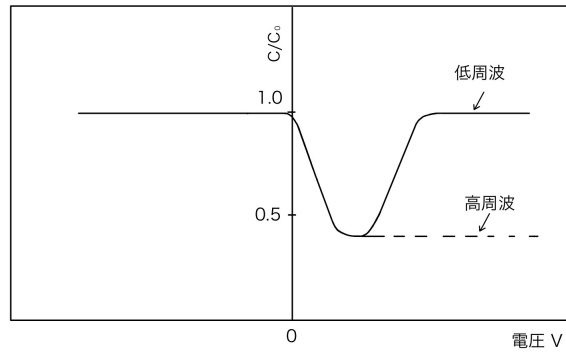


図 5: MOS 構造の C - V 特性

### 3 実験方法

#### 3.1 使用器具

本実験での使用器具を表 2 に示す.

表 2: 使用器具

No	機器名	型番	シリアル No	備考
1	横型管状電気炉			
2	ドラフター			
3	スピンコーター			
4	ジェットオープン			
5	真空蒸着装置			
6	超音波洗浄機			
7	ホットプレート			
8	マスクアライナ			
9	顕微鏡			
10	LCR メータ			
11	定電圧電源			
12	グローブボックス			
13	シリコン基板			

#### 3.2 実験方法

[1] より, MOS 構造の作成工程を以下に示す. 完成した MOS 構造の静電容量 - 電圧特性, 周波数依存性を測定した.

- 1) プライムウェーハ初期洗浄  
排気装置であるドラフターの中で表 3 の手順に従って洗浄作業を行った.

表 3: 初期洗浄方法

手順	洗浄方法	時間 [分]	使用ビーカー
1	セミコクリーン 23 による超音波洗浄	5	セミコクリーン
2	純水オーバーフロー	5	セミコクリーン - H <sub>2</sub> O
3	遠心乾燥	1	

## 2) 酸化膜形成

酸化膜形成の条件を以下に示す.

- 電気炉の温度：1060°C
- レギュレータ圧力：酸素 3 L/min, 窒素 3 L/min
- ガス流量：酸素 1 kg/cm<sup>2</sup>, 窒素 1.2 kg/cm<sup>2</sup>
- 酸化時間：50 分, 65 分, 80 分

実際には電気炉を稼働させてから最初の 20 分は温度が安定せず, 一時的に 1160°C まで上昇した.

次に, 酸化膜形成の手順を以下に示す.

- 窒素を流すスイッチ (1 - SV) が ON で, 窒素フローメーターが 3 L/min であることを確認した.
- ウェーハを石英製ホルダーにセットし, そのホルダーごと電気炉の入口の手前 (電気炉の外) に置いた.
- 手袋をし, 電気炉の入口に石英棒で, ウェーハをゆっくりと中央に挿入し, 蓋をした.
- 酸素を流すスイッチ (2-SV) を ON, 酸素フローメーターが 3 L/min であることを確認した.
- 1 - SV を OFF, 窒素を 0 にした.
- 酸化時間後, 1 - SV を ON, 窒素フローメーター 3 L/min であることを確認した.
- 2 - SV を OFF, 酸素を 0 にした.
- 手袋をし, 電気炉の蓋を取った.
- ウェーハをゆっくりと取り出し, 入口のところで 2 分間置いた.
- 電気炉の外まで引出し, 3 分置いた後, トレイからウェーハを 1 枚取った.
- (c) に戻り, 全てのウェーハを所定時間酸化し終わるまで続けた.

## 3) 表面 Al 蒸着

ゲートとなる金属 (Al) をウェーハ表面に蒸着した. 蒸着減となるタングステンヒータと Al 塊を表 4 のように有機洗浄した. その後, 真空蒸着装置にウェーハ, タングステンヒータと Al 塊をセットし, 装置内を真空にした後, 蒸着.

表 4: タングステンヒータとアルミの有機洗浄方法

手順	洗浄方法	時間 [分]	使用ピーカ
1	アセトン	5	AL - US
2	メタノール	5	AL - US
3	アセトン	5	AL - US
4	メタノール	5	AL - US
5	ホットプレート上で乾燥		

## 4) フォトリソグラフィ

蒸着した Al 薄膜を 2mm 角の電極パターンとして形成するため, フォトリソグラフィを行った. 使ったレジストは感光部が溶けるポジ型を使用するため, 定着液も必要となった. 窒素中プリバークのあと, コンタクトアライナ方式により露光され, 現像後, ポストバークを行った. フォトリソグラフィの手順は以下に示す.

- ジェットオープンの設定温度が 110 度, 窒素流量が 5 L/min であることを確認した.
- ウェーハを金属網の上に載せ, 網ごとジェットオープンに入れ, 3 分間ベーキングを行った.
- ジェットオープンから網ごとウェーハを取り出した.

- (d) スピナーの電源が入っていること、壁にある真空弁が開いていることを確認した。
- (e) スピナーの中央部にある試料台に Al 電極面を上に向けてウェーハを置いた。
- (f) 真空チャックスイッチを ON にした。
- (g) 定着液 (OAP) をスポイトで滴下後、スピナーをスタートさせた。
- (h) ポジレジスト (OFPR - 800) をスポイトで滴下した。レジストの粘度が高いため、直径 2.5cm 程度の円になるように多めに滴下する。
- (i) ウェーハを網の上に置き、残りのウェーハも同様の手順を行った。
- (j) ジェットオープンに網ごとウェーハを入れ、90 秒ベーキングを行った。
- (k) 網ごとウェーハをマスクアライナのところに運んだ。
- (l) マスクアライナのマスクホルダ両脇にあるマスクロックレバーを外側に向け、リリースした。
- (m) マスクフォルダを持ち上げて開き、試料台の中心が合い、円の中に試料が入るようにウェーハを設置した。
- (n) 試料固定ボタンを ON にした。
- (o) マスクフォルダを閉じ、両脇のマスクロックレバーを内側にしてロックした。
- (p) マスクパターンがウェーハの Al の中に完全に収まるように X,Y まわしで調整した。
- (q) 試料台 Z 軸動作ボタンを ON にして、8 秒間露光した。
- (r) ランプハウスを後ろに移動させ、試料台 Z 軸動作ボタンを OFF にした。
- (s) マスクホルダの両脇のマスクロックレバーを外側にして、リリースし、マスクホルダを開いた。
- (t) 試料固定スイッチを OFF にし、試料を取り出した。残りのウェーハについても同様にを行った。
- (u) 露光を終えたウェーハをフッ素樹脂製ディッパーに装着した。
- (v) 2 台のスターラーの電源が入っていることを確認した。
- (w) ウェーハを 1 枚ずつ、攪拌中の現像液の中に 2 分間ディッパーごと浸した。感光した部分だけのレジストが落ち、マスクの模様が反転出現することを確認した。
- (x) ウェーハ上の水分を飛ばすため、窒素ガンでウェーハに対して窒素を吹きかけた。
- (y) 窒素流量 5 L/min のジェットオープンにウェーハを入れ、110℃ で 3 分間ベーキングを行った。

#### 5) Al エッチング

パターン通りに Al エッチングし、電極を形成する。エッチングの条件は表 5 に示す。

表 5: アルミエッチングの方法

手順	洗浄方法	温度 [°C]	時間 [分]	使用ビーカー
1	エッチング液 泡が出なくなるまで浸す	43	泡が出なくなるまで	AL - ETCH
2	純水オーバーフロー		1	AL - H <sub>2</sub> O
3	遠心乾燥		1	

エッチング液はホットプレートで 43 度に上げた。温度はエッチング液に入れた温度計で測定した。43 度のエッチング液は高い粘性を示した。ウェーハを単独で入れてしまうと後で取り出しにくいので、ウェーハはピンセットに挟んだまま液に浸した。Al の溶液はエッチング液中に気泡が生じることによって確認できた。泡がなくなったとき、エッチングを終了し、純水オーバーフローを行った。



#### 6) レジスト除去

Al 電極上のレジストを有機溶媒で除去。ウェーアトレごと洗浄し、メタノールに浸すときはホットプレートを使用した。表 6 にレジスト除去の方法を示す。

表 6: レジスト除去の方法

手順	洗浄方法	温度 [°C]	時間 [分]	使用ビーカー
1	リンス 1		3	AL - RINSE1
2	リンス 2		1	AL - RINSE1
3	アセトン		浸す	AL - ACETONE
4	メタノール	沸騰	浸す	AL - METHANOL
5	ホットプレートの紙上で乾燥	150		

#### 7) 表面レジスト塗布

この後の行程の裏面酸化膜エッチングでの表面酸化膜および、Al 電極の保護のため、表面をレジストでコーティングした。手順はフォトリソグラフィの (a) から (j) までをもう一度行った。

#### 8) 裏面酸化膜エッチング

エッチングにはバッファードフッ酸を用いた。シリコンはバッファードフッ酸に対して撥水性を有するためウェーハがエッチング液をはじくのを確認したら、その後 30 秒間フッ酸に浸し、純水オーバーフローを行った。以下に手順を表 7 に示す。

表 7: 裏面酸化膜エッチングの方法

手順	洗浄方法	時間 [分]	使用ビーカー
1	バッファードフッ酸	ウェーハがフッ酸をはじくまで +0.5	G - BHF
2	純水オーバーフロー	5	G - H <sub>2</sub> O - BHF
3	遠心乾燥	1	

#### 9) レジスト除去

表 6 と同様の手順で表面のレジストを除去した。

#### 10) Al 蒸着

タングステンヒータとアルミ塊の洗浄を行い表面と同様にアルミ蒸着を行った。ウェーハは裏面酸化膜エッチングしたものを蒸着装置にセットした。

### 3.3 測定方法

#### 3.3.1 アルミゲート電極面積測定

- 1) 測定前に標準器により、較正を行った。
- 2) アルミ電極の大きさは 2mm 角や 4mm 角とされているが、今回は 2mm 角のアルミ電極に対して顕微鏡を用いて正確な電極面積を測定した。
- 3) 実験時間の都合上、班員 1 名が測定したデータをそのまま測定値として結果に用いた。

#### 3.3.2 容量測定

- 1) グローブボックス内のプローブにウェーハをセットした。

- 2) 定電圧電源により，酸化膜上のアルミ電極 (ゲート) に外部電圧を加えた．  
印加電圧は± 10V の範囲で容量が大きく変化する間隔で測定を行った．
- 3) 電圧印加時の静電容量を LCR メータを用いて測定した．
- 4) 測定周波数 1k, 10k, 100k, 1M の 4 種類を測定した．

## 4 実験結果

### 4.1 アルミゲート電極面積測定

酸化時間ごとのウェーハの電極面積を表 8 に示す．

表 8: 酸化時間ごとの電極面積

	酸化時間 [分]		
	50	65	80
横 [ $\mu\text{m}$ ]	1963.58	1967.32	1966.92
縦 [ $\mu\text{m}$ ]	1971.53	1967.32	1969.34
面積 [ $\text{nm}^2$ ]	3871.26	3870.35	3873.53

表 8 より，実際には 1 辺が 2mm 未満しかないとわかる．加えて，容量測定などの操作によってアルミ電極の一部がはがれていることが確認できた．

### 4.2 容量測定

試料の酸化時間ごとの印加電圧による静電容量特性を表 9, 10, 11 に示す．それぞれの電圧 - 静電容量のグラフを図 6, 7, 8 に示す．

酸化時間が 50 分の試料の測定結果を表 9 に示す.

表 9: 酸化時間 50 分のウェーハの電圧 - 容量特性

印加電圧 [V]	周波数 [kHz] ごとの静電容量 [nF]			
	1000	100	10	1
-10	1.51	1.45	1.44	1.44
-8	1.51	1.44	1.44	1.44
-6	1.50	1.43	1.43	1.43
-4	1.48	1.41	1.41	1.41
-3	1.44	1.39	1.38	1.38
-2.8	1.43	1.37	1.37	1.37
-2.6	1.41	1.35	1.35	1.35
-2.4	1.38	1.32	1.32	1.32
-2.2	1.33	1.28	1.28	1.28
-2	1.25	1.21	1.21	1.21
-1.8	1.11	1.09	1.10	1.10
-1.6	0.862	0.911	0.970	0.946
-1.4	0.639	0.66	0.754	0.718
-1.2	0.524	0.511	0.535	0.518
-1	0.457	0.444	0.499	0.453
0	0.350	0.344	0.345	0.680
1	0.350	0.343	0.344	0.710
2	0.350	0.343	0.344	0.694
4	0.350	0.343	0.344	0.737
6	0.351	0.343	0.344	0.750
8	0.351	0.344	0.345	0.762
10	0.351	0.344	0.345	0.774

表 9 より, 酸化時間 50 分の電圧 - 静電容量特性のグラフを図 6 に示す.

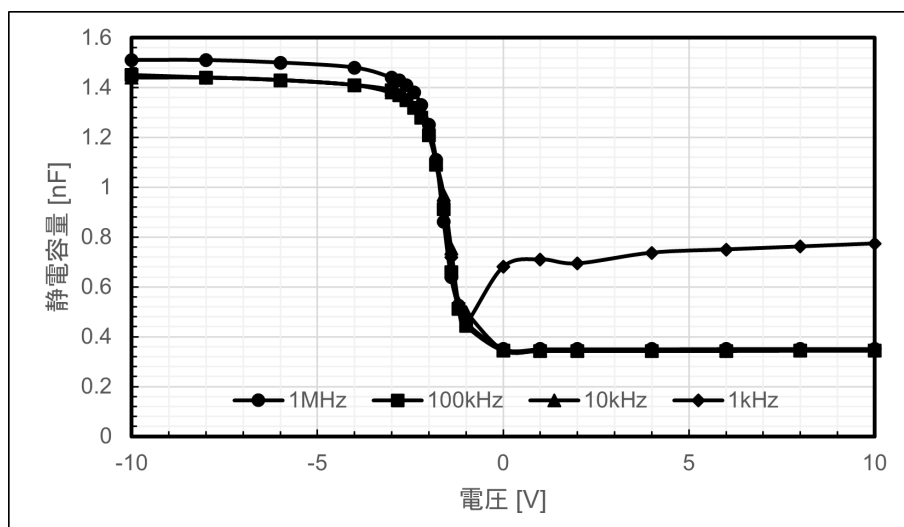


図 6: 酸化時間 50 分のウェーハの電圧 - 静電容量特性のグラフ

図 6 より, 印加電圧が-1V 以上では, 1kHz の時のみ静電容量が - 10V のときの静電容量の 2/5 倍程度になっていることがわかる. それ以外の周波数では静電容量が大幅に減少したままになっている.

酸化時間が 65 分の試料の測定結果を表 10 に示す.

表 10: 酸化時間 65 分のウェーハの電圧 - 容量特性

印加電圧 [V]	周波数 [kHz] ごとの静電容量 [nF]			
	1000	100	10	1
-10	1.26	1.21	1.20	1.20
-8	1.26	1.20	1.20	1.20
-6	1.25	1.19	1.19	1.19
-4	1.23	1.17	1.18	1.18
-3	1.20	1.14	1.14	1.14
-2.8	1.18	1.13	1.13	1.13
-2.6	1.16	1.11	1.11	1.11
-2.4	1.12	1.08	1.08	1.08
-2.2	1.06	1.03	1.03	1.03
-2	0.967	0.962	0.969	0.970
-1.8	0.815	0.856	0.890	0.898
-1.6	0.634	0.68	0.767	0.817
-1.4	0.522	0.523	0.577	0.67
-1.2	0.458	0.448	0.459	0.537
-1	0.415	0.405	0.409	0.625
0	0.378	0.371	0.374	0.97
1	0.379	0.375	0.375	1.00
2	0.381	0.382	0.38	1.02
4	0.383	0.383	0.388	1.03
6	0.384	0.384	0.394	1.04
8	0.388	0.386	0.396	1.05
10	0.389	0.387	0.399	1.05

表 10 より, 酸化時間 65 分の電圧 - 静電容量特性のグラフを図 7 に示す.

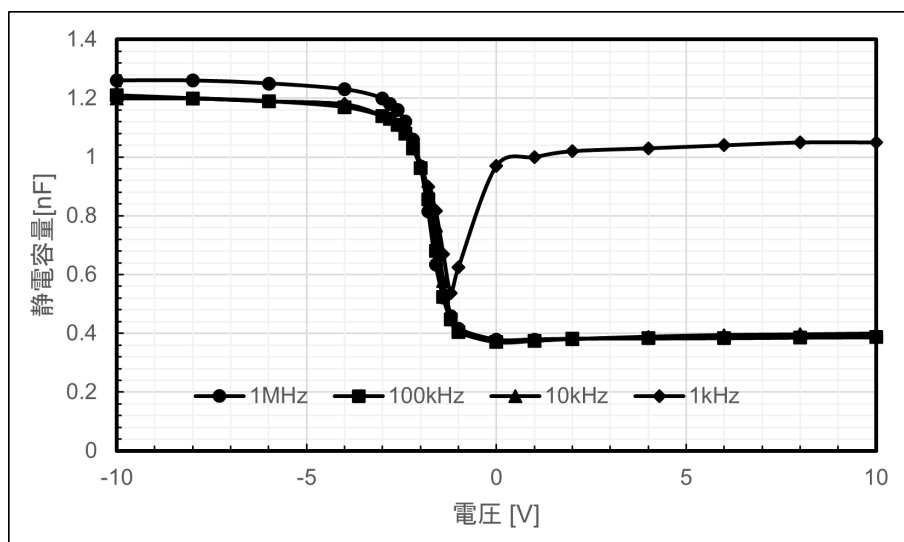


図 7: 酸化時間 65 分のウェーハの電圧 - 静電容量特性のグラフ

図 7 より, 印加電圧が-1V 以上では, 1kHz のときのみ静電容量が - 10V のときの静電容量の 3/4 倍程度になっていることがわかる. それ以外の周波数では静電容量が大幅に減少したままになっている.

酸化時間が 80 分の試料の測定結果を表 11 に示す。

表 11: 酸化時間 80 分のウェーハの電圧 - 容量特性

印加電圧 [V]	周波数 [kHz] ごとの静電容量 [nF]			
	1000	100	10	1
-10	1.04	0.989	0.99	0.991
-8	1.04	0.985	0.988	0.989
-6	1.04	0.981	0.983	0.985
-4	1.02	0.97	0.972	0.974
-3	1.01	0.952	0.955	0.956
-2.8	0.999	0.947	0.948	0.949
-2.6	0.989	0.938	0.939	0.94
-2.4	0.975	0.924	0.925	0.926
-2.2	0.953	0.904	0.905	0.906
-2	0.919	0.872	0.872	0.873
-1.8	0.858	0.818	0.819	0.819
-1.6	0.751	0.733	0.739	0.741
-1.4	0.606	0.604	0.635	0.652
-1.2	0.495	0.481	0.503	0.545
-1	0.430	0.415	0.424	0.453
0	0.356	0.362	0.524	0.917
1	0.359	0.375	0.592	0.951
2	0.392	0.38	0.606	0.962
4	0.395	0.387	0.614	0.970
6	0.397	0.398	0.618	0.974
8	0.398	0.419	0.621	0.976
10	0.400	0.426	0.623	0.977

表 11 より，酸化時間 80 分の電圧 - 静電容量特性のグラフを図 8 に示す。

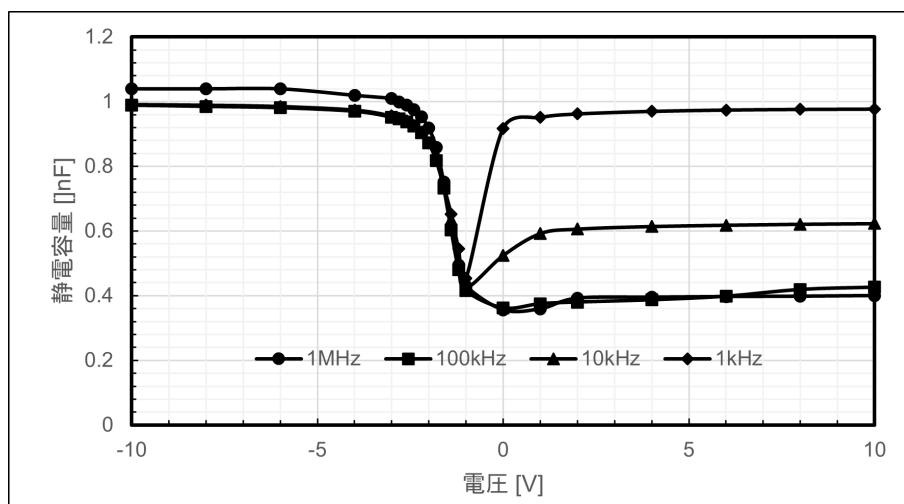


図 8: 酸化時間 80 分のウェーハの電圧 - 静電容量特性のグラフ

図 8 より，印加電圧が-1V 以上では，1kHz のときにはほぼ - 10V のときの静電容量まで戻っていることがわかる．加えて，10kHz のときには - 10V のときの静電容量の 1/3 倍程度まで戻っていることがわかる．

### 4.3 酸化膜厚の算出

ゲート電圧が -10V(蓄積状態) のときの  $C$  より以下の式から酸化膜厚  $T$  を求めた. 測定した 4 種類の周波数 (1MHz, 100kHz, 10kHz, 1kHz), 3 種類の酸化時間 (50 分, 65 分, 80 分) において導出した.

$$C = \epsilon_{OX} S/T = 3.9 \epsilon_0 S/T \quad (3)$$

ここで,  $S$  は電極面積,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} [\text{F/m}]$ ,  $\text{SiO}_2$  の比誘電率は 3.9 とした.  
式を変形して,

$$T = 3.9 \epsilon_0 S/C \quad (4)$$

式 4 に代入して計算した結果を表 12 に示す.

表 12: 酸化時間における各周波数での酸化膜厚

酸化時間 [分]		50	65	80
電極面積 [ $\text{nm}^2$ ]		3871.26	3870.35	3873.53
酸化膜厚 $T[\text{nm}]$	1000kHz	88.49	106.02	128.55
	100kHz	92.15	110.40	135.18
	10kHz	92.79	111.32	135.05
	1kHz	92.79	111.32	134.91

表 12 から酸化時間と酸化膜厚のグラフを図 9 に示す.

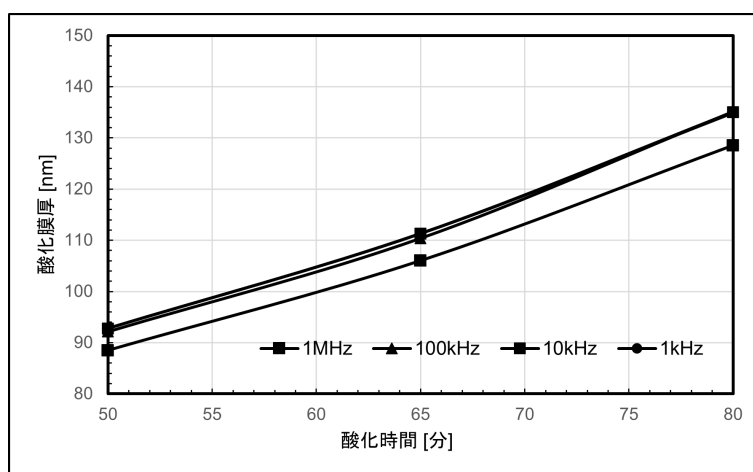


図 9: 酸化時間による酸化膜厚の変化

図 9 より, 酸化時間と酸化膜厚は比例関係にあり, 酸化時間が増加するほど酸化膜厚は厚くなる  
ことがわかる.

## 5 考察

### 5.1 シリコンウェーハ洗浄方式

本実験でシリコンウェーハの初期洗浄に用いた洗浄方式はセミコクリーンによる超音波洗浄 (ウェット洗浄) を行った. 本節では, それ以外の洗浄方式について調査した. [2] より, ウェーハ洗浄の種類は

- 化学的洗浄
- 物理的洗浄

の2種類に大別され、その中でも化学的洗浄では

- ウェット洗浄
- ドライ洗浄

の2種類に分けられる。ここで、ドライ洗浄について詳しく調べることにした。以下にそれぞれの洗浄方式の特徴を示す。

#### 1) ドライ洗浄

ウェット洗浄では、大量の薬液を使用・廃棄する必要があるなどの問題がある。それを解決するために考案された方式である。ドライ洗浄の例を以下に示す。

- 気相洗浄法  
気相洗浄法とは、化学薬品の気体や蒸気を用いてウェーハ表面を洗浄する方式のことである。基本的に、ウェーハ表面の不純物と気相状態の薬液との反応によって不純物が溶解・除去される。しかし、気体の密度が非常に低いため、反応を促進させるため、エネルギー源として熱、光、プラズマ、粒子線などを用いる。
- プラズマ洗浄  
プラズマ洗浄とは、ウェーハ表面に付着した不純物をプラズマで分解・気化することによって除去する方法である。酸素プラズマによって発生する酸素イオンなどは反応性が高く、ウェーハ上の不純物と反応して  $\text{CO}_2$  や  $\text{H}_2\text{O}$  を生成することで揮発除去される。
- 極低温エアロゾル洗浄  
極低温エアロゾル洗浄とは、極低温ガス中で凝固した固体粒子と不純物の衝突によってウェーハ上の不純物を物理的に除去する方法である。極低温 (-160～-150 度) 付近で一定の圧力をかけた際にガスと液体の混合相を形成する気体を用いている。
- 超臨界流体洗浄  
回路パターンが微細な半導体では洗浄によるパターンの倒壊が発生する。これを解決するために、超臨界流体を用いて洗浄する方法である。[2] によると超臨界状態において、流体はガスと同等の拡散性と液体同様の溶解力を有し、さらに表面張力がゼロになるという。これにより、複雑な回路パターンを持つ半導体でもパターン倒壊のリスクを減らすことができる。

## 5.2 シリコンウェーハの色

酸化膜形成を行った際に、酸化時間によってシリコンウェーハの色が変色した。この現象について調査を行う。物理的に類似していると考えたのは CD の裏面やシャボン玉表面などで虹色の膜が見られる現象と同様のものだと考えた。それについて詳しく調べていく。

類似していると仮定した現象は [3] によると、「薄膜干渉」と呼ばれ、薄膜表面で反射する光と薄膜で屈折し、その奥で反射した光が干渉して、青色などの様々な色を形成している。この薄膜干渉がシリコンウェーハとその表面に形成される酸化膜によって起きていると仮定する。表 12 からわかるように、酸化時間が変化すると、酸化膜厚が厚くなることから、酸化膜で屈折してシリコンウェーハで反射するまでの距離が長くなり、干渉する光の波長が短くなると考えられる。酸化時間が長いウェーハほど、すこし緑がかって見えたことから、今回の実験では仮定したものと同一現象が起きていると予想する。したがって、薄膜干渉により、シリコンウェーハの色が変化したと考える。

## 5.3 ポジレジスト、ネガレジストの違い

ポジレジスト、ネガレジストの違いについて調査する。今回の実験で用いたのはポジ型レジストで、これは露光行程で光があたった箇所が水溶性になって溶解し、現像工程後になくなるレジストである。ネガ型レジストは逆に、露光行程で光があたった箇所が硬化し、水に不溶になり、現像工程後に残る。[4] によると、昔はネガ型レジストの方が主流であったが、回路集積化によって微細なパターンの部分以外を固めるとなるとかなり高感度でなければいけないため、感度の点でポジ型に劣るということから現在ではポジ型レジストが主流と言われている。

## 5.4 C - V 特性の比較

理想 C - V 特性である図 5 と実測値である図 6,7,8 を比較してみる。理想特性では低周波の際に、減衰前の静電容量まで増えていることがわかる。そして、高周波の場合には全く増加しないことがわかる。図 8 の 1kHz のときのグラフではおおよそ理想通りに増加していることがわかる。しかし、図 6,7 の 1kHz のときのグラフでは理想よりも静電容量が小さくなっていることがわかる。この原因については、酸化時間によって酸化膜の厚さが変わることによって蓄えることのできる静電容量が異なると考えられる。酸化時間が長くなるほど形成される酸化膜は厚くなるので酸化膜とアルミ表面の距離が長くなることがわかる。これを静電容量の式  $C = S/d$  に対応させると、 $d$  が酸化膜とアルミ表面の距離と考えれば、酸化時間が長いほど静電容量は小さくなると予想できる。そのまま考えると、酸化時間が長いほど静電容量が小さくなっていくのだが、逆に、酸化時間が短すぎると、酸化膜の形成される面積が小さいのではないかと考察する。酸化膜が形成する面積と、酸化膜厚の増加の関係において、形成される面積の増加量が酸化膜厚の増加量よりも大きい場合は静電容量が増加する。反対に、形成される面積が酸化膜厚の増加量よりも小さくなれば、静電容量が小さくなっていくと考えられる。これにより、ある時間までは静電容量が時間とともに増加し、一定時間後に時間とともに静電容量が減少するような関係になっているのではないかと考察した。

## 5.5 酸化膜厚の比較

[1] の図 1.6 と本報告書の図 9 を比較する。[1] の図 1.6 では両対数グラフが用いられており、図 9 とは表示が異なるが、値としては酸化温度が 1000 度のグラフから、酸化時間が 50 分のとき、酸化膜厚は  $0.2\mu\text{m}$ 、酸化時間 80 分のとき、酸化膜厚は  $0.3\mu\text{m}$  を示していた。実測値は表 12 から、酸化時間が 50 分で測定周波数が 1kHz のとき、酸化膜厚は  $0.092\mu\text{m}$ 、酸化時間 80 分のとき、酸化膜厚は  $0.135\mu\text{m}$  を示していた。比較すると、それぞれ約  $0.1\mu\text{m}$  の差があることがわかる。これは恐らく、電極面積の差や測定周波数、酸化温度による誤差であると考えられる。電極面のアルミが一部削れていたり酸化温度が一定ではなかったことが静電容量や電極面積に影響を与えたのではないかと予想する。しかし、酸化時間によって酸化膜厚が増加するというグラフの傾向は同じであったため、今回の実験はおおむね理想特性通りの特性を得られることができたと思われる。

## 6 所感

今回の実験で初めて神戸高専のクリーンルームに入ることができた。以前インターンで製薬会社のクリーンルームに入る機会があったが、それと比較するとかなり管理のクラスは低くなっていると実感した。クリーンルーム内の装置(特に電気炉)がそこそこ年季が入っているという印象を受けた。それ以外では、MOS 構造の作成行程でシリコンウェハの色が酸化時間によって変化することがとても興味深く、それぞれの手順の時間設定がどのような根拠に基づいて実験を行っているのかが個人的に気にかかる部分であった。

## 参考文献

- [1] 西 敬生「実験実習指導書」神戸高専電子工学科 pp.09 - 14
- [2] Semi journal「Si ウェハーの洗浄法」閲覧日 2023/06/25  
<https://semijournal.jp/basics/sichem/cleaning2.html>
- [3] ITES「恋する半導体『可視光線編』」閲覧日 2023/06/26  
<https://www.ites.co.jp/wafer/semikoi.05.html>
- [4] 永田 敬「フォトリソグラフィ」閲覧日 2023/06/26  
<http://www.osakac.ac.jp/labs/matsuura/japanese/lecture/semicondic/ha/ha021.pdf>