

1 実験条件

実験日時 2010（平成 22）年 6 月 17 日木曜日 午後 1 時～午後 3 時半

天気 晴れ

気圧・気温・湿度 省略

2 実験の目的

MOS 型電界効果トランジスタ（MOSFET：Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）の構造と動作原理を学び、実験でその静特性を確認することを目的とする。

3 実験の原理

1. MOSFET の構造と動作原理 MOSFET は近年の半導体デバイスのおよそ 95% を構成する素子で、集積回路に多数埋め込まれている。図 1 に示すのが MOSFET の構造である。シリコン基板上にソース・ドレイン端子を対に並べ、その間を SiO_2 の絶縁膜で電気的に分断し、ゲート端子を設けた素子である。ゲートにかかる電圧を制御することでドレイン電流を変化させることができるスイッチング特性を持つ。

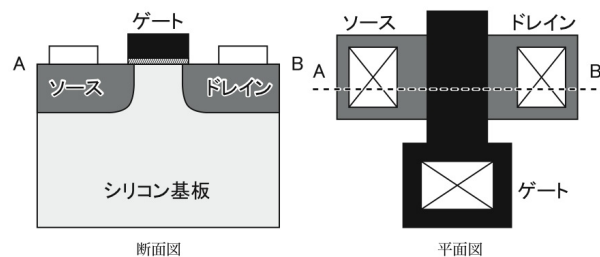


図 1 MOSFET の構造

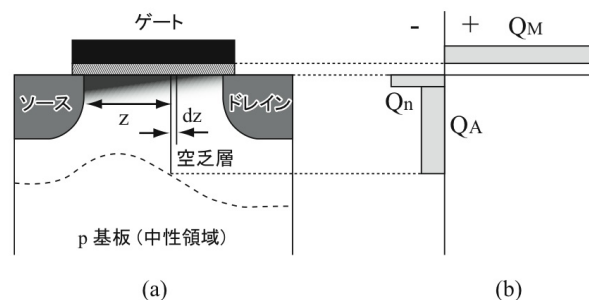


図 2 (a) n-MOSFET の断面図 (b) ソースからの距離 z の部分での電荷分布

以下、MOSFET の特性を解析する。表面反転層中のキャリア移動度 μ は電界に依存せず、ソース・ド

レイン間の電界はゲートが作る電界に比べて小さいと仮定する。図 2 に n チャネル MOSFET の断面図及び電界分布を示した。 V_{GS} : ゲート電圧 (シリコン基板を電位の基準とする)、 $\psi_s(z)$: ソース端から z の位置のシリコンの表面電位とおくと、 SiO_2 膜両端に加わる電位差は $V_{GS} - \psi_s(z)$ と表される。 C_{ox} : SiO_2 膜の単位面積当たりの静電容量とおくと、 $Q = CV$ よりゲート電極の単位面積当たりに誘起される電荷 Q_M は

$$Q_M = C_{ox}[V_S - \psi_s(z)] \quad (1)$$

となる。シリコン基板中の電荷は保存されるから、 $Q_n(z)$: 点 z の表面反転層内に存在する電荷、 Q_A : シリコン中のアクセプタの電荷とおけば

$$Q_M + Q_A + Q_n = 0 \quad (2)$$

すなわち

$$Q_n(z) = -(Q_M + Q_A) = -C_{ox}[V_{GS} - \psi_s(z)] - Q_A \quad (3)$$

となる。ここで、チャネルの表面電位 $\psi_s(z)$ について、MOS キャパシタの場合に反転層が形成されると、ゲート電界が反転層中キャパシタによって遮蔽されることから表面電位が一定値になることと。MOSFET の場合はソース・ドレイン間の電界の影響があることから ϕ_F : 基板内部のフェルミ準位と真性フェルミ準位の電位差、 $V(z)$: ソース・ドレイン間電圧とおくと

$$\psi_s(z) = 2\phi_F + V(z) \quad (4)$$

と表され、結局 Q_A は ϵ_s : シリコンの比誘電率 11.7、 N_A : シリコン基板中のアクセプタ濃度とおけば

$$Q_A = -\sqrt{2q\epsilon_s\epsilon_0 N_A \{2\phi_F + V(z)\}} \quad (5)$$

となる。

一方ソース・ドレイン電流 I_{DS} について考えると、 $I = envs$ 、 $v = \mu E$ より

$$I_{DS} = -q\mu_n W E_z \int n(x) dx \quad (6)$$

ただし x : シリコン表面から基板内部への垂直距離、 E_z : チャネル内のソース・ドレイン間の電界、 μ_n : チャネル内の電子の移動度、 $n(x)$: チャネル内の電子密度、 W : チャネル幅とした。ここで

$$E_z = -\frac{dV}{dz} \quad (7)$$

$$Q_n(x) = -\int qn(x) dx \quad (8)$$

の関係を式 (6) に代入し、

$$I_{DS} = -\mu_n W Q_n \frac{dV}{dz} \quad (9)$$

を得る。右辺の Q_n を式 (3) で置き換え、さらに $\psi_s(z)$ を式 (4) で、 Q_A を式 (5) で置き換えて、両辺を z で積分すれば

$$\int_0^L I_{ds} dz = \mu_n W \int_0^{V_{DS}} [C_{ox}\{V_{GS} - 2\phi_F - V(z)\} - \sqrt{2q\epsilon_s\epsilon_0 N_A \{2\phi_F + V(z)\}}] dV \quad (10)$$

すなわち

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu_n \left[C_{ox} \left\{ V_{GS} - 2\phi_F - \frac{1}{2} V_{DS} \right\} V_{DS} - \frac{2}{3} \sqrt{2q\epsilon_s\epsilon_0 N_A} \left\{ (2\phi_F + V_{DS})^{\frac{3}{2}} - (2\phi_F)^{\frac{3}{2}} \right\} \right] \quad (11)$$

が導出できる。これが MOSFET の静特性を表す。

2. 強反転領域での静特性式 (11) で V_{DS} が小さい時を仮定すると

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] \quad (12)$$

$$V_T = 2\phi_F + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\epsilon_s\epsilon_0 N_A (2\phi_F)} + V_{FB} \quad (13)$$

と変形できる。ただし V_T : しきい値電圧 (シリコン基板に表面反転層が形成され始めるゲート電圧)、 V_{FB} : フラットバンド電圧 (ゲート材料とシリコン基板との仕事関数差などによって酸化膜に印加される電圧の補正項) である。 V_{DS} が大きい時は式 11 をドレイン-ソース電圧で偏微分することでドレインコンダクタンスを計算でき、

$$g_{DD} = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} = \frac{W}{L} \mu_n \left[C_{ox} \{ V_{GS} - 2\phi_F - V_{DS} \} - \sqrt{2q\epsilon_s\epsilon_0 N_A} \{ 2\phi_F + V_{DS} \} \right] \quad (14)$$

となる。ただし

$$V_{DS} = V_{GS} - 2\phi_F + K^2 \left(1 - \sqrt{1 + \frac{2V_{GS}}{K^2}} \right) \quad (15)$$

$$K = \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{q\epsilon_s\epsilon_0 N_A} \quad (16)$$

のとき $V_{DD} = 0$ となる。この条件は $z=L$ の点で $Q_n = 0$ となることを表しており、このときチャネル全体に反転層は形成されない。ドレイン電圧 V_{DS} がそれ以上ならば、ドレインの空間電荷がチャネル方向に伸び、反転層ができていた端の点、すなわち $Q_n = 0$ となるピンチオフ点がソース側に移動する。この時のピンチオフ点電位 V_{DSP} は式 (14) と同様

$$V_{DSP} = V_{GS} - 2\phi_F + K^2 \left(1 - \sqrt{1 + \frac{V_{GS}}{K^2}} \right) \quad (17)$$

となる。ドレイン電流は式 (10) の積分区間をソースからピンチオフ電圧までに変更して求めることになり、ピンチオフ点の位置を $Z = L_p$ とすれば

$$I_{DS} = \frac{W}{L_p} \mu_n \left[C_{ox} \left\{ V_{GS} - 2\phi_F - \frac{1}{2} V_{DS} \right\} V_{DS} - \frac{2}{3} \sqrt{2q\epsilon_s\epsilon_0 N_A} \left\{ (2\phi_F + V_{DS})^{\frac{3}{2}} - (2\phi_F)^{\frac{3}{2}} \right\} \right] \quad (18)$$

となる。ドレイン接合の空間電圧層の厚さ $L - L_p$ は

$$L - L_p = \left[\frac{2\epsilon_s\epsilon_0}{qN_A} (V_{DS} - V_{DSP}) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

となる。式 (18)・(19) より V_{DS} が増加すると L_p は減少するから、 I_{DS} は大きくなる関係が導かれる。

3. 低電流領域での静特性実際の MOSFET では、 $V_{gs} < V_T$ でも微小な I_{DS} が流れる。この時の MOSFET の静特性はバイポーラトランジスタの動作と対応させて解析することができる。ただし前提としてチャネル内のキャリア密度が低く、チャネル全体の表面電位がゲート電圧によって一意に定まることとする。この時の拡散電流は $J_n = eD \frac{dn}{dz}$ より A：電流経路の断面積、n：位置 z における電子密度、 n_q ：熱平衡状態での基板中の電子密度とすると

$$I_{DS} = -AqD_n \frac{\partial n}{\partial z} = \frac{AqD_n \{n(0) - n(L)\}}{L} \quad (20)$$

$$n(0) = n_q \exp\left(\frac{q\psi_s}{k_B T}\right) \quad (21)$$

$$n(L) = n_q \exp\left(\frac{q(\psi_s - V_{DS})}{k_B T}\right) \quad (22)$$

と表される。ここで電流経路の断面積はチャネル幅 W と弱反転層厚 d の積で表されることから、d を近似的に電子密度が $1/e$ に低下するシリコン酸化膜界面からの距離と考えれば

$$d = \frac{k_B T}{q} \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0}{2qN_A \psi_s}} \quad (23)$$

となり、結局ドレイン電流は

$$I_{DS} = \frac{W}{L} k_B T D_n n_q \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0}{2qN_A \psi_s}} \exp\left(\frac{q\psi_s}{k_B T}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{qV_{DS}}{k_B T}\right)\right] \quad (24)$$

ただしゲート電圧 V_{GS} と表面電位 ψ_s の間には

$$V_{GS} = \psi_s + \sqrt{\frac{2q\epsilon_s \epsilon_0 N_A \psi_s}{C_{ox}}} + V_{FB} \quad (25)$$

の関係が成り立つ。右辺第一項はシリコン基板内の電圧降下、第 2 項は空乏層中のアクセプタイオンによる電圧効果を示す。解析的に式 (25) を解くには、弱反転領域内の中間電位 $\psi_s = 1.5\psi_F$ 付近でテイラー展開して 1 次微分項までを取り出して

$$V_{GS} = V_{GS}^0 + \left(\frac{dV_{GS}}{d\psi_s}\right)(\psi_s - 1.5\psi_F) \quad (26)$$

と計算できる。ただし添字 0 は $\psi_s = 1.5\psi_F$ の時の値であることを表す。なお、式 (25) より C_D ：空乏層容量とすると

$$\frac{dV_{GS}}{d\psi_s} = 1 + \frac{C_D}{C_{ox}} \quad (27)$$

となるので、式 (24) を書き換えることができ

$$I_{DS} = I_{DS}^0 \exp\left(\frac{qV_{GS}}{mk_B T}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV_{DS}}{k_B T}\right)\right] \quad (28)$$

と近似式を得ることができる。ただし $m = (dV_{GS}/d\psi_0)^0$ とした。この式より、弱反転領域ではドレイン電流はゲート電圧に対して指数関数的に増加していることが分かる。それに対してドレイン電圧に関する項の変化は微小なので、ほとんど依存性はないと言える。

4 使用器具及び装置

- n チャンネル MOSFET
- デジタルマルチメーター
- 直流電圧源
- 配線
- 顕微鏡
- プローバー
- 筆記用具・グラフ用紙・実験レジュメ・実験ノート・カメラ

5 実験結果

- (1) 顕微鏡で電子回路基板上の MOSFET を観察した様子を図 3 に示す。

図 3 基板上の MOSFET の観察

- (2) はじめに実験回路として図 4 に示すような回路を組み立てた。使用したトランジスタを Tr_0 とする。次に $V_{GS}=1.000V$ 、 $1.053V$ 、 $1.100V$ の 3 段階に固定し、 V_{DS} を変化させて $I_{DS} - V_{DS}$ 特性を得た。生データを表 1 に、それをもとにプロットしたグラフを図 5 に示す。
- (3) 実験 2 と同じ回路において、 $V_{DS}=0.1008V$ 、 $0.202V$ 、 $0.301V$ の 3 段階に固定し、 V_{GS} を変化させて $I_{DS} - V_{GS}$ 特性を得た。生データを表 2 に、それらをもとにして各 V_{DS} ごとにプロットしたグラフを図 6～8 に、同じグラフにまとめたものを図 9 に示す。

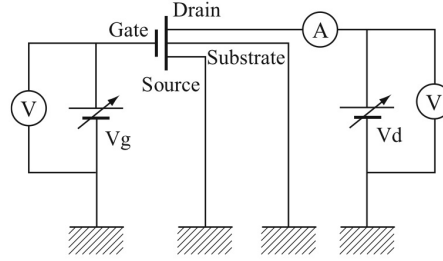


図 4 実験回路

表 1 V_{GS} をパラメータとした $I_{DS} - V_{DS}$ 特性 (Tr_0)

$V_{gs}=1.000V$		$V_{gs}=1.053V$		$V_{gs}=1.100V$	
$V_{ds}[mV]$	$I_d[A]$	$V_{ds}[mV]$	$I_d[A]$	$V_{ds}[mV]$	$I_d[A]$
0.1	3.2.E-10	0.1	1.0E-09	0.1	4.4E-09
2.0	2.2.E-08	2.0	4.70E-08	2.0	9.2E-08
3.7	4.1.E-08	5.2	1.12E-07	4.6	1.96E-07
6.5	6.9.E-08	8.0	1.62E-07	8.1	3.21E-07
12.0	1.14.E-07	10.3	2.01E-07	10.3	3.94E-07
15.2	1.37.E-07	13.6	2.50E-07	13.6	4.80E-07
18.5	1.55.E-07	16.9	2.94E-07	16.9	5.60E-07
22.6	1.72.E-07	20.2	3.33E-07	20.2	6.35E-07
26.8	1.94.E-07	23.5	3.62E-07	23.5	6.90E-07
31.8	2.12.E-07	28.4	3.99E-07	28.4	7.80E-07
38.3	2.35.E-07	33.4	4.39E-07	33.4	8.33E-07
51.5	2.64.E-07	36.7	4.65E-07	36.7	8.76E-07
61.4	2.79.E-07	49.9	5.23E-07	43.3	9.30E-07
72.9	2.89.E-07	63.6	5.57E-07	53.2	1.02E-06
86.9	2.89.E-07	82.8	5.80E-07	64.0	1.08E-06
103.3	2.90.E-07	91.0	5.91E-07	82.7	1.15E-06
111.0	2.97.E-07	110.8	6.00E-07	91.8	1.16E-06
122.5	3.00.E-07	131.7	6.11E-07	110.8	1.18E-06
140.4	3.03.E-07	170.0	6.25E-07	132.2	1.20E-06
170.2	3.07.E-07	199.0	6.30E-07	171.6	1.19E-06
199.0	3.06.E-07			199.6	1.20E-06

表 2 V_{DS} をパラメータとした $I_{DS} - V_{GS}$ 特性 (Tr_0)

$V_{ds}=0.1008V$		$V_{ds}=0.202V$		$V_{ds}=0.301V$	
$V_{gs}[mV]$	$I_d[A]$	$V_{gs}[mV]$	$I_d[A]$	$V_{gs}[mV]$	$I_d[A]$
0	5.0E-11	0	5.00E-11	0	5.00E-11
100.6	5.0E-11	99.4	5.00E-11	101.4	5.00E-11
204	5.0E-11	201	4.00E-11	202	3.00E-11
304	1.0E-11	301	2.00E-11	300	1.00E-11
404	8.0E-11	400	1.00E-10	400	1.00E-10
504	3.8E-11	501	4.30E-10	500	4.40E-10
554	7.00E-09	555	8.70E-10	553	8.50E-10
602	1.39E-09	601	1.52E-09	604	1.61E-09
649	2.40E-09	651	2.82E-09	652	2.95E-09
705	5.32E-09	703	5.55E-09	704	5.65E-09
748	9.50E-09	740	8.95E-09	738	8.73E-09
781	1.45E-08	771	1.35E-08	768	1.27E-08
801	1.85E-08	808	2.16E-08	811	2.19E-08
820	2.62E-08	832	2.99E-08	829	2.78E-08
850	3.88E-08	866	4.76E-08	861	4.37E-08
875	5.33E-08	900	7.53E-08	899	7.12E-08
900	7.49E-08	924	1.02E-07	920	9.57E-08
925	1.05E-07	942	1.29E-07	944	1.33E-07
939	1.25E-07	960	1.68E-07	959	1.64E-07
950	1.49E-07	982	2.29E-07	982	2.29E-07
975	2.09E-07	1004	3.04E-07	1001	2.97E-07
1003	3.10E-07				

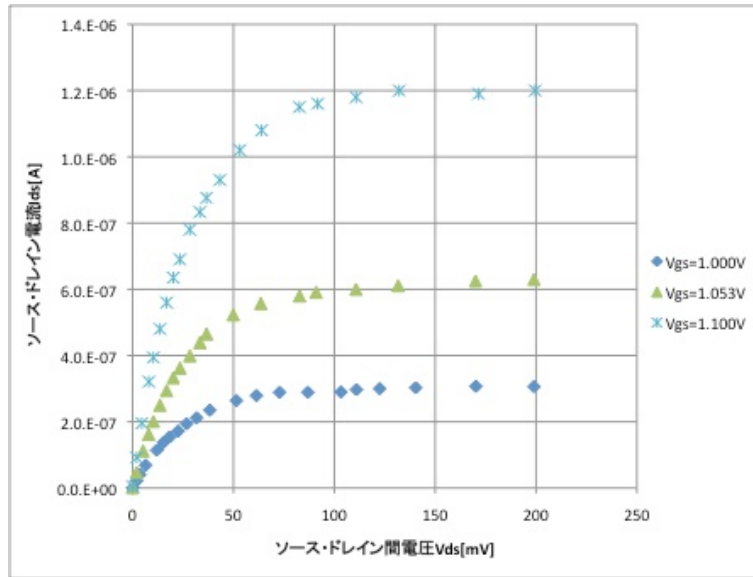


図5 V_{GS} をパラメータとした $I_{DS} - V_{DS}$ 特性のグラフ (Tr_0)

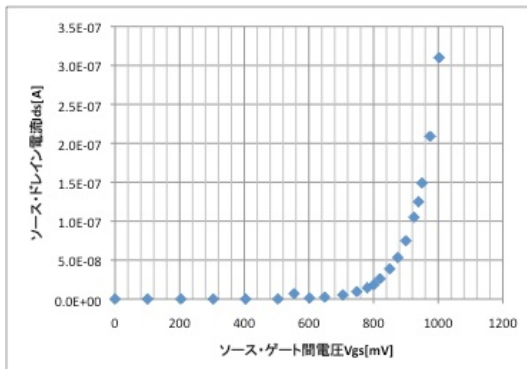


図6 V_{DS} をパラメータとした $I_{DS} - V_{GS}$ 特性のグラフ ($Tr_0, V_{DS}=0.1008V$)

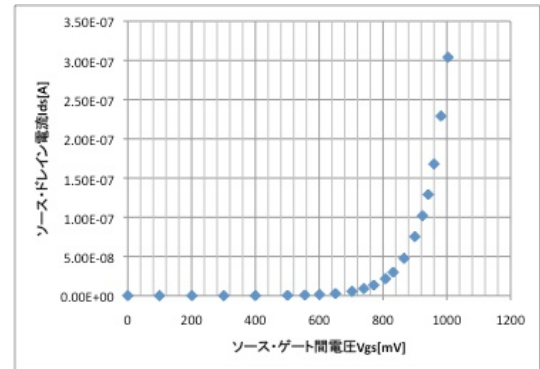


図7 V_{DS} をパラメータとした $I_{DS} - V_{GS}$ 特性のグラフ ($Tr_0, V_{DS}=0.202V$)

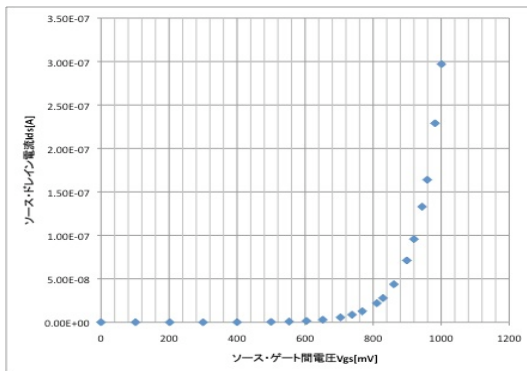


図8 V_{DS} をパラメータとした $I_{DS} - V_{GS}$ 特性のグラフ ($Tr_0, V_{DS}=0.301V$)

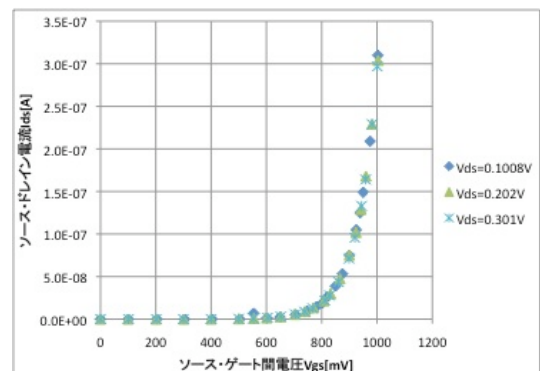


図9 V_{DS} をパラメータとした $I_{DS} - V_{GS}$ 特性のグラフ (Tr_0)

表 3 Tr_1 のパラメータ

W	20 μm
L	0.5 μm
V_{FB}	-1.0V
ϕ_F	0.5V
C_{ox}	18nm
N_A	$7.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

表 4 V_{GS} をパラメータとした $I_{DS} - V_{DS}$ 特性 (Tr_1)

$V_{GS}=1V$		$V_{GS}=2V$		$V_{GS}=3V$	
$V_{ds}[V]$	$I_{ds}[mA]$	$V_{ds}[V]$	$I_{ds}[mA]$	$V_{ds}[V]$	$I_{ds}[mA]$
0	0	0	0	0	0
0.05	0.103	0.05	0.298	0.05	0.429
0.0998	0.188	0.1	0.591	0.1	0.847
0.15	0.254	0.15	0.856	0.15	1.263
0.2	0.302	0.2	1.107	0.2	1.659
0.25	0.337	0.25	1.33	0.25	2.02
0.3	0.362	0.3	1.528	0.3	2.359
0.35	0.381	0.35	1.704	0.35	2.674
0.4	0.395	0.4	1.87	0.4	2.967
0.45	0.407	0.45	1.994	0.45	3.236
0.5	0.417	0.5	2.102	0.5	3.475
0.55	0.427	0.55	2.195	0.55	3.696
0.6	0.436	0.6	2.274	0.6	3.887
0.65	0.445	0.65	2.337	0.65	4.057
0.7	0.453	0.7	2.39	0.7	4.206
0.8	0.468	0.8	2.474	0.75	4.346
0.9	0.483	0.9	2.535	0.8	4.46
1	0.497	1	2.582	0.85	4.562
1.2	0.524	1.2	2.658	0.9	4.649
1.4	0.549	1.4	2.719	0.95	4.728
1.6	0.575	1.6	2.774	1	4.794
1.8	0.599	1.8	2.824	1.1	4.904
2	0.624	2	2.872	1.2	4.989
2.2	0.65	2.2	2.918	1.3	5.058
2.4	0.68	2.5	2.993	1.4	5.117
2.5	0.696			1.6	5.211
				1.8	5.289
				2	5.359
				2.2	5.42
				2.5	5.507

6 検討

検討にあたって、各パラメータが表 3 のように分かっている Tr_1 を導入する。また Tr_1 の $I_{DS} - V_{DS}$ 特性を表 4 および図 10 に、 $I_{DS} - V_{GS}$ 特性を表 5 および図 11~14 に示す。

- (1) $I_{DS} - V_{DS}$ 特性の傾きに相当するドレインコンダクタンス g_{DD} は式 (14) から計算できる。右辺の V_{DS} の符号はマイナスであるため、 V_{DS} が増加するとドレインコンダクタンスは減少する。よって $I_{DS} = g_{DD}V_{DS}$ より I_{DS} も減少すると考えられる。実験結果からの図 5 と図 10 では、たしかに V_{DS}

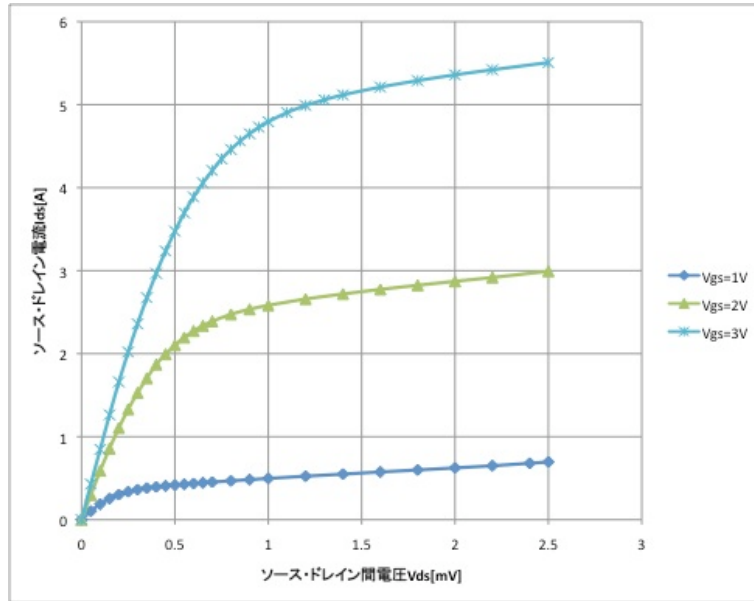


図 10 V_{GS} をパラメータとした $I_{DS} - V_{DS}$ 特性のグラフ (Tr_1)

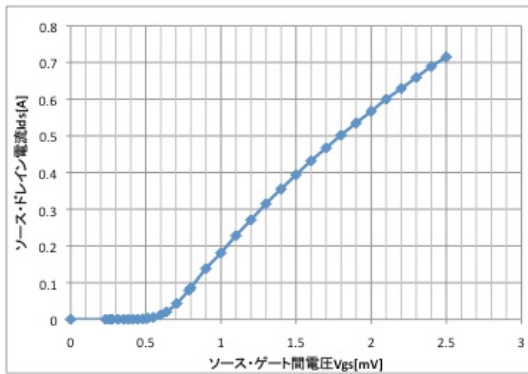


図 11 V_{DS} をパラメータとした $I_{DS} - V_{GS}$ 特性のグラフ ($Tr_1, V_{DS}=0.1V$)

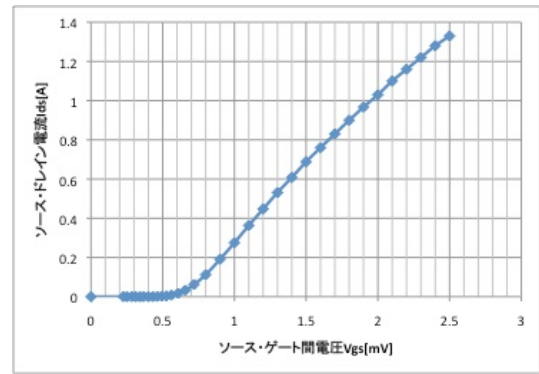


図 12 V_{DS} をパラメータとした $I_{DS} - V_{GS}$ 特性のグラフ ($Tr_1, V_{DS}=0.2V$)

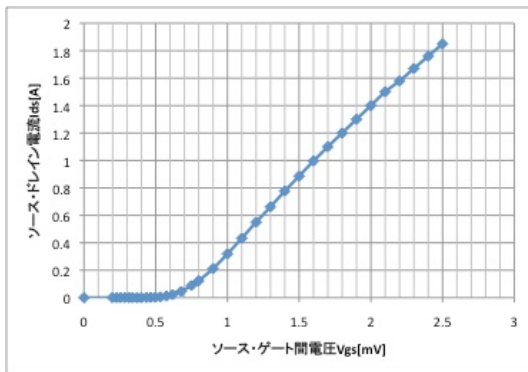


図 13 V_{DS} をパラメータとした $I_{DS} - V_{GS}$ 特性のグラフ ($Tr_1, V_{DS}=0.3V$)

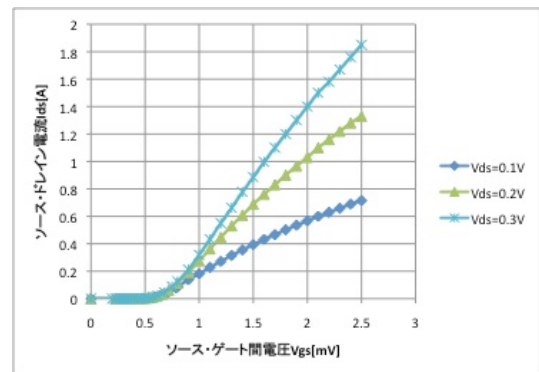


図 14 V_{DS} をパラメータとした $I_{DS} - V_{GS}$ 特性のグラフ (Tr_1)

表5 V_{DS} をパラメータとした $I_{DS} - V_{GS}$ 特性 (Tr_1)

Vds=0.1V		Vds=0.2V		Vds=0.3V	
Vgs[V]	Ids[mA]	Vgs[V]	Ids[mA]	Vgs[V]	Ids[mA]
0	0	0	0	0	0
0.233	3.00E-06	0.226	3.00E-06	0.198	2.00E-06
0.26	7.00E-06	0.251	7.00E-06	0.228	4.00E-06
0.277	1.10E-05	0.285	1.60E-05	0.256	9.00E-06
0.316	2.80E-05	0.312	3.20E-05	0.286	2.00E-05
0.354	7.40E-05	0.341	6.50E-05	0.315	4.20E-05
0.384	1.53E-04	0.367	1.23E-04	0.339	7.60E-05
0.414	3.03E-04	0.4	2.68E-04	0.37	1.63E-04
0.446	6.38E-04	0.432	5.54E-04	0.4	3.40E-04
0.48	1.33E-03	0.462	1.15E-03	0.436	7.30E-04
0.514	2.69E-03	0.493	2.22E-03	0.465	1.46E-03
0.55	5.35E-03	0.526	4.31E-03	0.498	2.88E-03
0.597	1.16E-02	0.561	8.09E-03	0.533	5.75E-03
0.638	2.04E-02	0.608	1.71E-02	0.575	1.18E-02
0.706	4.30E-02	0.658	3.29E-02	0.618	2.23E-02
0.787	7.94E-02	0.719	6.24E-02	0.678	4.57E-02
0.8	8.57E-02	0.8	1.12E-01	0.75	8.90E-02
0.9	1.38E-01	0.9	1.91E-01	0.8	1.24E-01
1	1.81E-01	1	2.75E-01	0.9	2.12E-01
1.1	2.28E-01	1.1	3.63E-01	1	3.19E-01
1.2	2.71E-01	1.2	4.47E-01	1.1	4.33E-01
1.3	3.15E-01	1.3	5.31E-01	1.2	5.50E-01
1.4	3.55E-01	1.4	6.08E-01	1.3	6.62E-01
1.5	3.94E-01	1.5	6.88E-01	1.4	7.77E-01
1.6	4.32E-01	1.6	7.60E-01	1.5	8.86E-01
1.7	4.67E-01	1.7	8.30E-01	1.6	9.96E-01
1.8	5.02E-01	1.8	9.00E-01	1.7	1.10E+00
1.9	5.35E-01	1.9	9.67E-01	1.8	1.20E+00
2	5.67E-01	2	1.03E+00	1.9	1.30E+00
2.1	6.00E-01	2.1	1.10E+00	2	1.40E+00
2.2	6.29E-01	2.2	1.16E+00	2.1	1.50E+00
2.3	6.59E-01	2.3	1.22E+00	2.2	1.58E+00
2.4	6.89E-01	2.4	1.28E+00	2.3	1.67E+00
2.5	7.15E-01	2.5	1.33E+00	2.4	1.76E+00
				2.5	1.85E+00

が増加するに従って $I_{DS} - V_{DS}$ カーブの傾きが小さくなっていることが確認できる。

- (2) Tr_0 のしきい値電圧を図 6～8 から求めたところ表 6 のようになった。

表6 Tr_0 の各 V_{DS} の値におけるしきい値電圧

$V_{DS}=0.1008V$	$V_T=0.60V$
$V_{DS}=0.202V$	$V_T=0.60V$
$V_{DS}=0.301V$	$V_T=0.60V$

同様に Tr_1 のしきい値電圧を図 11～13 から求めたところ表 7 のようになった。一方 Tr_1 のしきい値電圧の理論値は、式 (13) より求めることができる。酸化膜 SiO_2 の比誘電率が 3.9、シリコン Si の比誘電率が 12.0 であるから、

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{t_{ox}} = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 3.9}{18 \times 10^{-9}} = 1.91 \times 10^{-3} [F/m^2] \quad (29)$$

表7 Tr_1 の各 V_{DS} の値におけるしきい値電圧

$V_{DS}=0.1V$	$V_T=0.60V$
$V_{DS}=0.2V$	$V_T=0.65V$
$V_{DS}=0.3V$	$V_T=0.70V$

を用いて

$$V_T = 2 \times 0.5 + \frac{\sqrt{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 8.85 \times 10^{-12} \times 12.0 \times 7.7 \times 10^{16} \times 10^6 \times 2 \times 0.5}}{1.91 \times 10^{-3}} - 1.0 = 0.847[V] \quad (30)$$

となった。すなわち実験値は理論値よりも最大 30% 小さくなっている。この原因として MOSFET の個体差によるパラメータの誤差、例えば酸化膜の膜厚 t_{ox} やアクセプタ濃度 N_A のばらつきが考えられる。

しきい値電圧 V_T の値は式 (13) の示すように理論的には V_{DS} に依存しない。ただし、 Tr_1 のグラフからしきい値電圧がソース・ドレイン間電圧の上昇に伴って増加することが観察できるので、 V_T と V_{DS} に依存性があると考えられる。

- (3) Tr_1 について、図 14 の $I_{DS} - V_{GS}$ 特性グラフの I_{DS} の対数をとったグラフを図 15 に示す。このグラフは直線となることから、 I_{DS} は $\exp(V_{GS})$ に比例することが分かる。この結果を理論式 (28) と比べると、 V_{GS} が小さい領域では $\exp\left(\frac{qV_{GS}}{mk_B T}\right)$ の項が支配的になるため、理論とよく一致していると考えられる。

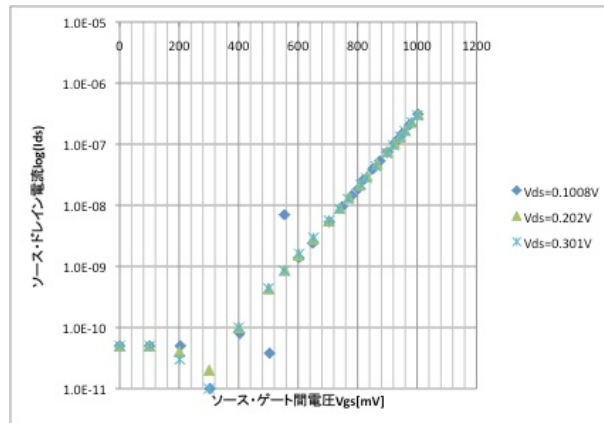


図 15 $\log(I_{DS}) - V_{GS}$ グラフ (Tr_1)

- (4) キャリア移動度を求めるために、式 (12) を微分する。はじめに $\frac{dI_{DS}}{dV_{DS}}$ 特性は

$$\frac{dI_{DS}}{dV_{DS}} = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_T - V_{DS}) \quad (31)$$

と表されるので、図 10 から $V_{DS}=0$ の傾きを読み取り、 Tr_1 のパラメータおよび検討 (2) で求めたしきい値電圧 V_T を代入して移動度 μ_n を求めたものを表 8 に示す。

同様に $\frac{dI_{DS}}{dV_{GS}}$ 特性は

$$\frac{dI_{DS}}{dV_{GS}} = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} V_{DS} \quad (32)$$

表 8 $\frac{dI_{DS}}{dV_{DS}}$ 特性から求めたキャリア移動度

$V_{GS}[\text{V}]$	$V_{DS}=0\text{V}$ における傾き $\frac{dI_{DS}}{dV_{DS}}$	キャリア移動度 $\mu_n[\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})]$
1V	2.06×10^{-3}	1762
2V	5.96×10^{-3}	677
3V	8.58×10^{-3}	522

表 9 $\frac{dI_{DS}}{dV_{GS}}$ 特性から求めたキャリア移動度

$V_{DS}[\text{V}]$	$V_{GS}=1\text{V}$ における傾き $\frac{dI_{DS}}{dV_{GS}}$	キャリア移動度 $\mu_n[\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})]$
0.1V	4.7×10^{-4}	615
0.2V	8.8×10^{-4}	576
0.3V	1.14×10^{-3}	497

で求められるので、図 14 より $V_{GS}=1$ の傾きを読み取り、 Tr_1 のパラメータを代入して移動度 μ_n を求めたものを表 9 に示す。

表 8 より、 V_{GS} が増加するとキャリア移動度 μ_n は減少することが分かる。これはソース・ゲート間電圧が大きくなるとゲートから基板への垂直方向電界が大きくなり、ソース・ドレイン間を移動する電子の移動がゲート方向にずれて散乱されるためであると考えられる。

また、表 9 より V_{DS} が増加するとキャリア移動度 μ_n は減少することが分かる。

7 結論

1. MOSFET はゲート・ソース・ドレイン端子と基板を持つ素子であり、ゲート電圧を制御することで Si 中の電子の移動をコントロールでき、スイッチング素子として幅広く利用されている。
2. しきい値電圧を超える強反転領域では、ソース・ゲート間電圧に比例してドレイン電流が大きくなる。ただしソース・ドレイン間電圧が増加するとドレイン電流は小さくなる。
3. 一方低電流領域では微量のドレイン電流が流れる。このときドレイン電流はソース・ゲート間電圧の指数関数に比例する。
4. キャリア移動度はソース・ゲート間電圧が大きくなるほど減少する。

8 謝辞

最後になったが、実験に協力してくれた班員の 5 人と、丁寧に指導して下さった先生方・TA の方々に感謝申し上げたい。

9 参考文献

- 実験テキスト「B5 電界効果トランジスタの基礎特性」
- 「大阪大学物理学実験 2008」大阪大学物理教育研究会編 学術図書出版社 第 2 版第 1 刷 第 2 編

- 「半導体デバイス工学」 谷口研二・宇野重康共著 昭晃堂 初版第 8 刷
- 「物理定数表 Physical Constants」 <http://www.mogami.com/paper/physical-constants.html>
- 「3. MOS 電界効果トランジスタ」 <http://rhodes.fuis.fukui-u.ac.jp/yamada/edu/exp/mosfet.pdf>
- 「 \LaTeX 2_ε 美文書作成入門 改訂第 4 版」 奥村晴彦著 技術評論社 第 4 版第 6 刷

以上