

竹井 澄明

2. MOSFETのデバイス特性(1)

ゲート電圧を一定にしておいてドレイン電圧を増加させていくと図1のような静特性が得られる。このMOSFETの静特性に今、 $V_{DS} = V_{GS} - V_{th}$ の線を引くと静特性と交差したポイント(ピンチオフ点と呼ぶ)で飽和領域と非飽和領域に分けられる。それぞれの領域での電流値を計算する近似式を式に示した。この式はいくつかの近似があるため正確ではないが、手計算に便利であるためIC設計者はよく利用している。

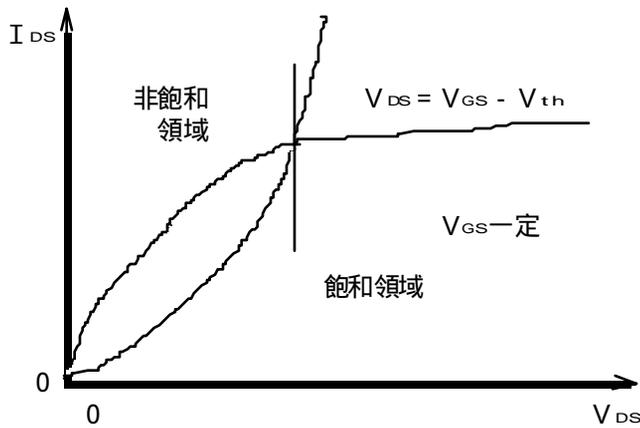


図1 MOSFETの静特性

図1において点線の左側は非飽和領域と呼ばれ、ドレイン電圧にほぼ比例してドレイン電流が増加します。そのため線型領域とか真空管に準じて3極管領域と呼ばれることもある。非飽和領域のドレイン電流の近似式は $I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \{ (V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - 1/2 \cdot V_{DS}^2 \}$ ---

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \{ (V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - 1/2 \cdot V_{DS}^2 \} \quad \dots$$

点線の右側は飽和領域と呼ばれ、ドレイン電圧が増加してもドレイン電流はほとんど変化しない。これは電圧を上げていってもほとんどの電圧がキャリアの無い高抵抗の空乏層に印加されるため、電流増加に寄与しないためです。飽和領域は真空管に準じて5極管領域とも呼ばれます。飽和領域のドレイン電流の近似式は $I_{DS} = 1/2 \cdot \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2$ ---

$$I_{DS} = 1/2 \cdot \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2 \quad \dots$$

この式は、 V_{th} の基板効果、チャネル変調効果、移動度の電圧依存性等を無視しているため正確な式ではありませんが、先ほど書きましたように概算には便利であるためよく利用されます。企業等でのIC設計では、SPICE等のソフトを使って、正確にしかもいろいろな条件(電圧、温度、寸法 W/L)を変えて回路シミュレーションを行い、設計値を決めています。

次にNMOSを例にしてチャネルの状態を調べてみましょう。電子の図記号は- 正孔の図記号は+ アクセプタの図記号はイオン化したアクセプタの図記号は A^+ とする。

まずソース、ドレイン、ゲート、バックゲートの4端子全てを0[V]に接地した場合。つまり

$$V_S = V_D = V_G = V_{BG} = 0 \text{ [V]}$$

この場合図2に示したように電荷の分布は $n^+ - p^-$ 接合の拡散電位により、接合近辺に空乏層(イオン化したアクセプタ)が存在する。 P^- 基板では電子が少数キャリアであり、電流として電子をキャリアに使うNMOSでは、ソース-ドレイン間に電子がほとんど存在しないため、ソース-ドレイン間は極めて高抵抗である。

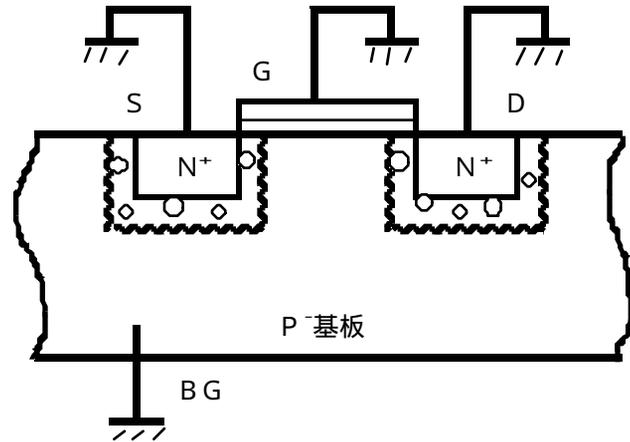


図2 $V_{GS} = 0$ 時のチャネル状態

次にゲート電圧がしきい値電圧以下の時を考える。つまり

$$0 < V_{GS} < V_{thN} \quad V_S = V_D = V_{BG} = 0 \text{ [V]}$$

V_{thN} 以下の正電圧を印加した場合、図3に示したように表面にはイオン化したアクセプタが存在し、誘起正電荷の数だけ正孔は内部へ追いやられて、空乏層は広がります。しかしその広がる長さは電圧の $\sqrt{}$ に比例するので、広がる割合は減少していきます。

ゲート電圧を0[V]から上げていった時、基板内部遠方の空乏層電荷で中和を引き出すよりも、近い表面近傍の中性シリコン原子から正孔を追い出して電子を発生させて中和を保つほうが低エネルギーで済むようになります。この時の電圧がしきい値電圧 V_{thN} で、この電圧以上では空乏層は増大せず電圧の増加は電子の増大に費やされる。これが次の段階である。

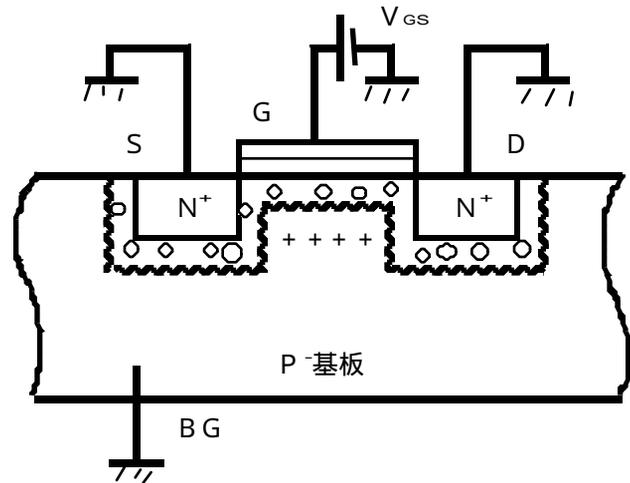


図3 $0 < V_{GS} < V_{thN}$ 時のチャネル状態

次にゲート電圧にしきい値電圧 V_{thN} 以上の電圧を印加した場合を考える。つまり

$$V_{thN} < V_{GS} \quad V_S = V_{BG} = 0 \text{ [V]} \quad V_{DS} = 0 \text{ [V]}$$

この場合 P^- 基板の少数キャリアである電子が半導体表面に誘起されチャネル(反転層)が形成される。その下の層はイオン化したアクセプタによる空乏層が存在する。

チャネルの形成によりソース-ドレイン間は、接続されその間の抵抗は格段に小さくなる。ゲート電圧により電子の数を加減できるのでソース-ドレイン間抵抗は自由に制御できる。

しかしドレイン電圧を増加させると、ドレイン端で空乏層