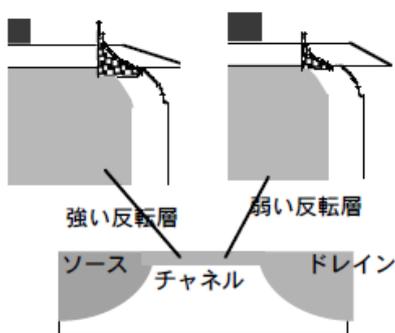


第 10 回 MOSFET ピンチオフの説明・直流特性

ドレイン電圧が大きいときの電圧-電流特性

さて、前回、ドレイン電圧が、ゲート電圧-しきい値に較べて充分小さな場合を考えた。けれど、これでは増幅動作はうまくいかない。当然、実際のデバイスはドレイン電圧を大きくかけている。その上で増幅動作をしている。則ち前回は、 $V_G - V_T \gg V_D$ の仮定の元でおこなったが、今回は、 $V_G - V_T >, =, \text{ or } < V_D$ の状態を説明する。



今日のところが、一番 MOS トランジスタで肝心なところ。ここさえ聞けば、あとは、各論になる。

さて、ドレイン電圧を大きくしよう。金属のゲート電圧は一定である。

従って、ドレイン側に行くに従って、実際に半導体-金属間にかかる電圧が小さくなることになる。

ここで注意 ここでは、空間的に二次元の空間、すなわちドレイン-ソース間方向と、MOS 構造の層厚方向の 2 方向におけるポテンシャルを考えているので 3 次元空間で無ければ理解できない。これが MOS トランジスタの理解を妨げている。とりあえず、MOS 構造の層厚方向の変化は非常に大きく、MOS 構造は常に反転状態として、電荷はすべてゲートで終端しているとする。その後にはドレイン-ソース間電圧の変化は緩やかとして変化を入れる。グラジュアルチャンネル近似と呼ばれている。

ここで、ソースでの電圧を 0 として、ドレイン方向に z 進んだ時に電圧が $V_c(z)$ になったとしよう。

当然 $0 = V_c(0)$ 、 $V_D = V_c(L)$ である。

位置 z での誘導される電子による電荷は、

$$Q_I = -\frac{\epsilon_{ox}}{d}(V_G - V_T - V_c(z)) \text{ となる。}$$

本当は、しきい値電圧は z の位置依存性を持つ。チャンネル下の空乏層厚が、 $V_c(z)$ によって異なるからである。第 12 回でしきい値電圧の決まり方をきちんと説明した後でないといこの訂正は行えないので、後で行う。

一方、位置 z での電界は $-\frac{dV_c(z)}{dz}$ となる。従って、位置 z での電流は、

$$I(z) = \mu W \frac{dV_c(z)}{dz} \frac{\epsilon_{ox}}{d} (V_G - V_T - V_c(z)) \text{ となる。}$$

定常状態ではトランジスタに流れる電流は一定。従って、この電流は一定。 I_D としよう。

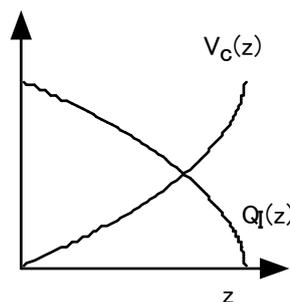
すると、 $\frac{I_D d}{\mu W \epsilon_{ox}} \frac{dV_c(z)}{dz} (V_G - V_T - V_c(z))$ でなければならないので、これを解くと、

$$(V_G - V_T)V_c(z) - \frac{V_c(z)^2}{2} - \frac{I_D d}{\mu W \epsilon_{ox}} z + c \text{ となる。}$$

ここで、 $0 = V_c(0)$ を入れると、

$$(V_G - V_T)V_c(z) - \frac{V_c(z)^2}{2} - \frac{I_D d}{\mu W \epsilon_{ox}} z$$

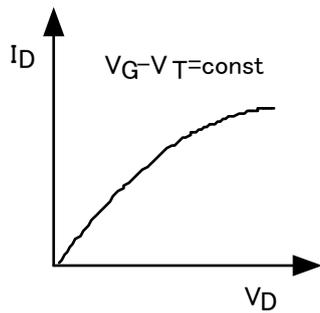
さて、 $V_c(z)$ と z の関係を図で示そう。



$V_D = V_c(L)$ を入れると、

$$(V_G - V_T)V_D - \frac{V_D^2}{2} - \frac{I_D d}{\mu W \epsilon_{ox}} L \text{ となる。従って、}$$

$$\text{電流 } I_D = \frac{\mu W \epsilon_{ox}}{L d} \left\{ (V_G - V_T)V_D - \frac{V_D^2}{2} \right\} \text{ となる。}$$



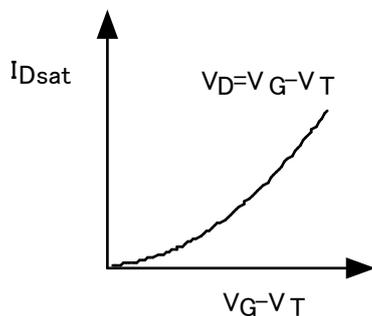
次に、 V_D を大きくしていった時に電流と V_D の関係を描こう。

V_D を大きくしていくと、あるところで、 I_D は最大の I_{Dsat} になる。

この時の V_D をピンチオフ電圧と呼び、 V_P で表す。

この時、 $V_P = V_G - V_T$ であり、

$I_{Dsat} = \frac{\mu W \epsilon_{ox} (V_G - V_T)^2}{L d}$ となる。この時、チャネルのドレイン端では、 $Q(z) = 0$ となっている。以後、この $Q(z) = 0$ となった点をピンチオフ点と呼ぶ。



これ以上電圧をかけると、どうなるか？ピンチオフ点で電荷が0であり、これ以上電圧を印加した場合、ドレイン近傍では、 $0 > V_G - V_T - V_D$ になり、反転状態では無くなる。

従って同じ式は使えない。ゲートからの電気力線はすべてアクセプタで終端された状態に戻る。

反転状態によって形成された電荷は、ピンチオフ点で0になり、それ以降存在できない。

そうすると、これ以上電圧をかけた場合、電流が流れなくなるか？

そうではない。ピンチオフ点近傍での、 $V_c(z)$ と z の関係を図で示し、電界すなわち $\frac{dV_c(z)}{dz}$

を考えると、ピンチオフ点で無限大になっていることが判る。移動度の式から考

えれば、速度も無限大になっている。そして、勢いづいて、反転状態で無くなった領域に入る。反転状態になっていないが、ポテンシャルは、反転状態のポテンシャルよりも低いので、この領域が電子を止める障壁となることはない。

ここで、今までと電気力線の向きが変わる。ゲートからの電気力線がすべてアクセプタで終端しているの、この電子の電気力線は、近傍の+に印加された場所、すなわちドレインのドナーで終端するように変わる。

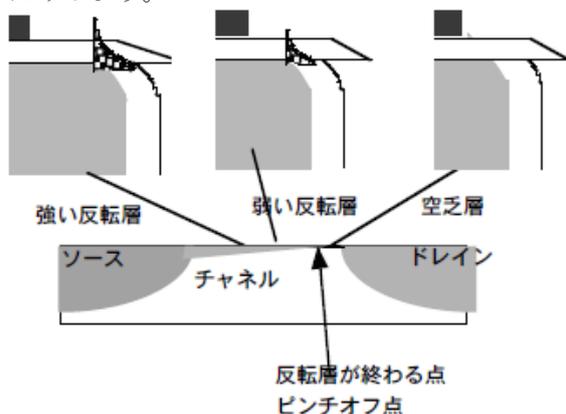
ここで、最初に仮定した"MOS構造の層厚方向の変化は非常に大きく、MOS構造は常に反転状態として、電荷はすべてゲートで終端しているとする。その後ドレイン-ソース間電圧の変化は緩やかとして変化を入れる。"が崩れてしまった。これが理解を難しくしていることに注意しよう。

さて、実際には、ピンチオフ点では電界は無限大にはならない。電流一定の式から始まったグラジュアル近似では、速度も電界に比例して大きくなるのが要求されるが、電子の速度に限界があるからである。

電子の速度は、光速(3×10^{10} cm/s)は越えられないし、バンド構造で決まる最大群速度(約 1×10^8 cm/s)も越えられない。普通は飽和速度と言われる光学フォノン散乱で決まる速度(約 1×10^7 cm/s)までしか速くならない。そこで、ある程度以上の電界がかかると、そのあと、電子速度は一定になり、電流一定であるべきことから、電荷量も一定となる。従って、正確な意味では、ゲートからの電界で誘起される電荷がなくなったところをピンチオフ点というべきである。また電界と電子の速度の関係が無くなったときとすべきという考え方もある。

さて、ピンチオフ点以降では、一定の電荷が走行するが、この電荷の速度と電界は関係ないので、大きな電界をかけることができる。すなわち、ピンチオフ点とドレイン間の空間電荷領域(実際には走行電荷も存在するがこう呼ぶことが多い)には大きな電圧が印加でき、ドレイン電圧が電流に関係なく設定できる。

実際に空間電荷領域の電界分布は、ここに存在する空間電荷を併せてポアソンの方程式を解くことで求まる。電流とピンチオフ点を与えてれば、ドレインの電圧は解析的に計算できる（これは学部レベルではない。例えばタウア・ニン”最新 VLSI の基礎”3.2.3 節をみよ）が、ここでは大きな電界をかけられるとだけしよう。



さて、流れる電流は、ピンチオフ点までの

$$I_D = \frac{\mu W \epsilon_{ox} (V_G - V_T)^2}{L_p d} \cdot \frac{L_p}{2}$$

距離を L_p とすると、 $I_D = \frac{\mu W \epsilon_{ox} (V_G - V_T)^2}{L_p d} \cdot \frac{L_p}{2}$ となる。式上では電流が V_D に依存しなくなる。通常、空間電荷領域の長さは充分短いとして、 $L_p = L$ として電流を表している。この仮定では電流は完全に飽和する。

さて、まとめて、直流特性を描こう。 V_G が V_T より低ければ、電流は流れない。 V_G が V_T より高くなると電流が流れ始める。従ってこの電圧差 $V_G - V_T$ は駆動能力を決める電圧であり、オーバードライブ電圧と呼ばれる。 $V_D = V_G - V_T$ でピンチオフ点になり、電流が最大となる。このときの $V_G - V_T$ はピンチオフ電圧と呼ばれ V_p で表されるが、あまり、置き換えをやると、ついて行きにくくなるので、この講義ではできるだけ $V_G - V_T$ のまま表記を続ける。

ここまでの電流が、立ちあがっていく領域を非飽和領域または、線形領域・三極管領域等と呼ぶ。

その後、 V_D を大きくしても飽和電流で一定となる。

この領域を飽和領域またはピンチオフ領域と呼ぶ。本講義前半で説明されたバイポーラでの飽和状態が、ベース領域中の小数キャリア

の挙動から名付けられている為、MOS の場合とは全く異なる意味を持っていることに注意しよう。

