

第2章

MOSFETの動作

ここでは、CMOS アナログ回路を動かすエンジンである MOSFET の動作原理とその簡易表現式について説明します。MOSFET はアナログ回路を構成するもっとも重要な基本能動デバイスです。デジタル回路では MOSFET を単なるスイッチとして使用しますが、アナログ回路では電流を高精度に制御する素子として利用します。このため、アナログ回路設計技術者になることを目指す方は、MOSFET の電圧電流特性をほぼ完璧に理解しておいてください。

2.1 MOS 素子の動作原理

CMOS アナログ回路の設計者は、素材である MOS 素子の動作特性を十分に理解したうえで設計を始めなければなりません。これは板前さんが野菜や魚などの素材を十分に吟味してから料理を始めることと同じです。

2.1.1 MOS 素子の電気的特性

低いドレイン電圧 V_{DS} を加えた状態でゲート電圧 V_{GS} を徐々に上げると、n チャンネル MOSFET のドレイン電流は、図 2-1 のように漸増する特性を示します。横軸がゲート電圧 V_{GS} 、縦軸がドレイン電流 I_D です。

ゲート電圧 V_{GS} が低いとチャンネル領域に十分な量の電子が集められないため、ドレイン電流はほとんど流れません。しかしゲート電圧 V_{GS} がしきい値電圧 V_T を越えると、チャンネル領域に電子が誘起され、ドレイン電流 I_D は $V_{GS} - V_T$ に比例して増加します。このようにゲート電圧に対してドレイン電流がほぼ直線的に増える電流領域を「強反転領域」と呼びます。強反転領域では、印加するドレイン電

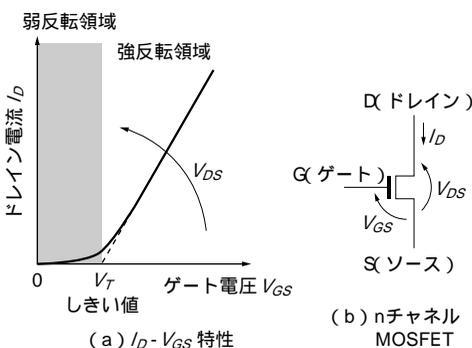


図 2-1 nチャネル MOSFET のゲート電圧 V_{GS} とドレイン電流 I_D の関係

ゲート電圧 V_{GS} がしきい値電圧 V_T 以下ではほとんどドレイン電流が流れないが、 V_T 以上にするとゲート電圧に比例してドレイン電流が増加する。前者のバイアス条件を弱反転領域、後者を強反転領域と呼ぶ。

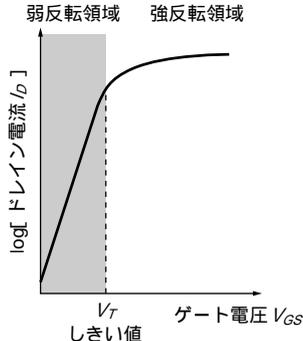


図 2-2 ゲート電圧とドレイン電流の関係 (対数表示)

ゲート電圧がしきい値電圧より小さい場合には、ドレイン電流はゲート電圧に対して指数関数的に増加する。図 2-1 のグラフの縦軸を対数で表示したものの。

圧 V_{DS} が大きくなると $I_D \cdot V_{GS}$ 特性のこう配もそれに比例して大きくなります。

逆に、しきい値電圧 V_T 以下のゲート電圧でドレイン電流がほとんど流れない動作領域を「弱反転領域」と呼びます。この領域のドレイン電流 I_D とゲート電圧 V_{GS} との関係を図 2-2 に片対数グラフで示します。

2.1.2 弱反転領域 ($V_{GS} < V_T$) の電気的特性

弱反転領域では、ゲート電圧 V_{GS} に対してドレイン電流は指数関数的に増加します。これは図 2-3 のように、シリコン/ゲート酸化膜 (Si/SiO_2) 界面付近のエネルギー障壁 (ソース領域の電子があふれ出るのを抑える土手) がゲート電圧に比例して低下することと、ソース領域の電子濃度がエネルギーの高い電子 (高速で動き回っている電子) ほど指数関数的に減少していること (ボルツマン分布) で説明できます。

このドレイン電流 I_D は、ドレイン電圧 V_{DS} には依存しません。ただし厳密に言えば、ドレイン電極からソース電極に向かう逆向きの電子電流が無視できないドレイン電圧 $V_{DS} < 0.1 \text{ V}$ ではドレイン電圧依存性が出てきます。

以上のことをまとめると、弱反転領域での MOS 素子特性は次の式で表されます。