

Quick review: 半導体から学ぶ電子回路の世界

深津龍一

2016年3月17日

今回の隅田さんの発表は電気系に進む者なら必ず学ぶであろうトランジスタに関するものであった。発表内容は主にトランジスタの動作原理、トランジスタを用いた様々な回路やメモリの紹介であった。

最初はトランジスタの材料である半導体についてであった。まず、エネルギー準位図を用いて金属、半導体と絶縁体の抵抗率が異なる原因、不純物をドーピングすることで得られる n-型、p-型半導体は真性半導体よりも少ないエネルギーでキャリアを生成できることの理由を説明した。最後に n-型半導体と p-型半導体を接合することで作られるダイオードを紹介した。このダイオード特性に関する説明は時間の都合上、大雑把なものになってしまったのは少し残念であったが大変理解しやすかった。バンド図を用いて説明すれば、MOS の動作原理を説明するときさらに深く説明することも可能になるかもしれない。

二章目はトランジスタのうち、特に n-MOS の動作原理についてであった。まず、トランジスタとは大雑把に言えばゲート端子が閾値電圧を超えるかどうかでソースドレイン間に電流が流れるか決まる、スイッチの一種だと説明した。そして、ゲート端子に電圧をかけると電流が流れる理由としてゲートにある金属、絶縁体、p-型半導体のサンドイッチ構造になっている部分が大事だと説明した。この部分はコンデンサのような働きをし、電圧をかけると絶縁体と p-型半導体の境界付近に電子を発生して、これを電流の通り道にすることでソースドレイン間に電流が流れることになる。もう少し詳しく説明すると金属、絶縁体、半導体の構造は MIS ダイオードと呼ばれる (以下、MIS と呼ぶ)。この MIS は一定の電圧を超えると強反転という状態から変化しなくなり、反転層 (先ほど説明した電流の通り道) の厚さが最大となる。しかし、ソースドレイン間にかかっている電圧が電流の流れる量に制限をかけてしまい、電圧が大きくなっていくと反転層が途切れるようになり電流が流れにくくなる。これはスライドの n-MOS の電流-電圧特性を見ていただければすぐに確認できると思う。最後に、トランジスタで実装可能なものを挙げ、微細化すれば性能が上がっていくが一方で様々な問題も生じることを紹介した。トランジスタの微細化はデバイスを発展させていく上で強力な指針であったが、物理的な限界が近づいてきているのが現状である。まだこれからも微細化が進んでいくのか、それとも新たな指針に切り替わるのか気になるところである。

三章目はデジタル回路についてであった。この章で特に重要な内容は論理回路の完全性である。論理回路の完全性とは $\{\text{AND, OR, NOT}\}$, $\{\text{AND, NOT}\}$, $\{\text{NAND}\}$, $\{\text{NOR}\}$ で所望の論理回路を必ず作成することができるというものである。この完全性の証明の概要を述べると、まず任意の論理回路を加法標準形または乗法標準形で表現できること、つまり $\{\text{AND, OR, NOT}\}$ で表現できることを示し、次に $\{\text{AND, NOT}\}$, $\{\text{NAND}\}$, $\{\text{NOR}\}$ で $\{\text{AND, OR, NOT}\}$ を表現できることを示せば証明できる。また他にも帰納法で証明するという手段もある。デジタル回路というと 2 進法での演算を思い付きやすいと思うが、順序回路の一種である入力を一時的に保持するフリップフロップもとても重要である。このフリップフロップはメモリに大に関係していて面白い内容だと思うので興味のある方は是非調べてみてほしい。

最後にムーアの法則と光エレクトロニクスや量子コンピュータ等の次世代の技術について紹介して終わった。ムーアの法則とは 18-24 ヶ月で集積密度が倍増するというもので、先ほども述べたように最近では物理的な限界が近づいてきているためこの法則が今後成り立たなくなるのかどうか注目されている。

全体を通して数式が出てくる場面はほとんどなく、初学者にもわかりやすい定性的な説明で十分に理解できる範囲にとどめてあることには大変感心した。これからデジタル回路やアナログ回路に関する話が聞けることを期待して終わりたいと思う。