

LSIの話

—IoT社会を支えるハードウェア—

(前編)

元 産業技術総合研究所・工学博士
鈴木 英 一

◆経歴◆
1972～2001 工業技術院電子技術総合研究所電子デバイス部 (主任研究員・ラボリーダー)
2001～2008 産業技術総合研究所エレクトロニクス研究部門 (副部門長、主幹研究員)
2008～2014 産業技術総合研究所産学官連携推進本部 (産学官連携コーディネータ)
産業技術総合研究所イノベーション推進本部 (イノベーションコーディネータ)
2014～2017 日本科学技術振興機構 (JST) ImPACTプログラム (プログラムマネージャー補佐)
1999～2007 東京理科大学客員教授
2012～2015 埼玉大学非常勤教授

1. はじめに

現在、ほとんどの人がスマホを片手に、情報の閲覧や通信を行っています。

また、モバイル機器だけでなく、あらゆる物がインターネットとつながるIoT(Internet of Things)技術が急速に拡がり、まさにIoT社会になっています。

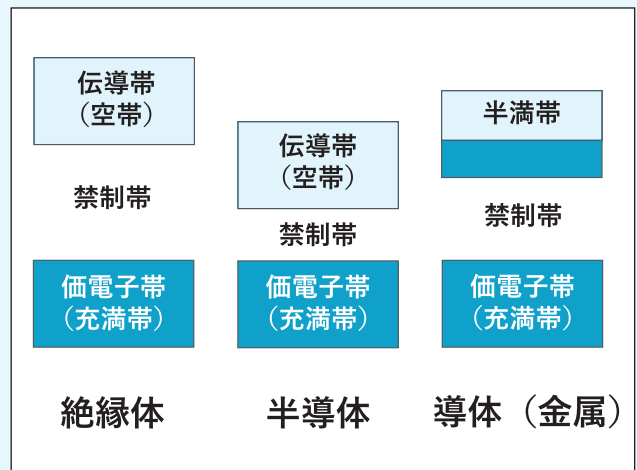
その背景にあるのは、ビッグデータであり、それらを抽出、情報処理を行っているものは、膨大な情報を一瞬にして処理をするIC(集積回路)、あるいはLSI(大規模集積回路)です。本稿は前編として、LSIを構成する電子材料、デバイス、集積化について、概観してみます。

2. 電子材料としての半導体

LSIの作製に用いられる半導体は、その名の通り、電気を通しやすい導体と通しにくい絶縁体の中間の材料です。

一般に、固体電子材料は、図1に示されるようなエネルギーバンド(帯)構造を持っており、電子が充満している価電子帯(充満帯)と、励起された電子が流れることのできる伝導帯(空帯)と、その間の電子が存在できない禁制帯から成り立っています。

価電子帯中では、バンド中の電子が存在できる



■図1 絶縁体、半導体、導体のエネルギーバンド(帯)構造(筆者作成)

全ての状態が埋まっており、励起できる状態がないので電流に寄与できません。伝導帯中の電子は、空の電子状態が多数あるので、電流を流すことが出来ます。

ただし、価電子帯で電子が抜けた状態は正の電荷として電流に寄与でき、これを正孔と呼びます。半導体では、電子と正孔が電気を運ぶキャリアになることができ、前者をn型半導体、後者をp型半導体と呼んでいます。

半導体が中間の導電性を持つことが、電子デバイスに使用される場合の決定的な利点となります。すなわち、半導体では、電流の流れ方を様々なコントロールできる可能性を持つからです。

3. シリコン (Si) という理想的な半導体

ほとんどのLSIは、半導体のシリコン (Si) で作られます。Siは、周期表の真ん中のIV価の元素で、ダイヤモンド型の結晶構造を持っています。

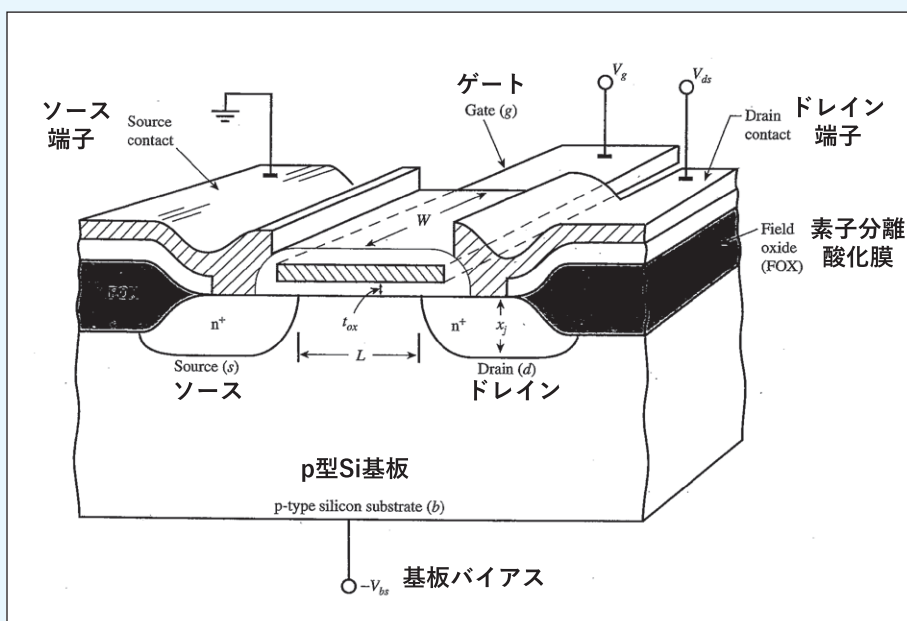
Siは、右に示すような奇跡的な長所を多く持っています。まれに見る長所を備えたSiが、情報処理、記憶LSIの発展を可能にしているのです。(図2)

4. なぜ、MOS電界効果トランジスタがLSIに使われるか

図3は、LSIを構成するMOS (Metal-Oxide-Semiconductor) 電界効果トランジスタ (MOSFET) の模式図です。キャリアが電子の場合、n型MOSFET (n-MOS) と呼びます。

MOSFETの特徴は、非常に簡単な構造の三端子素子ということです。p型Siの基板に、電流の入口のソースと出口のドレインとの間に、上から絶縁膜を介してゲートを設けたものです。

n-MOSの場合、制御用のゲートに正の電圧を印加すると、シリコン基板表面には電子が誘起され、n型のソース、ドレインとつながってチャンネルを形成することで、ON状態になります。



■図3 MOSFETの立体構造図

出所：N.Arora, MOSFET Models for VLSI Circuit Simulation, Springer-Verlag, Wien (1993)

〔Siの長所〕

- ① 地殻の重さの28%を占め、資源として無尽蔵にあります。
- ② 酸化されるとSiO₂となり、無害でデバイスに使用できるきわめて良質な絶縁物となります。
- ③ デバイスに使用するのに適した、熱の影響が軽微な1.1eVの禁制帯幅を持ちます。ちなみに、室温は0.026eVのエネルギーを持ちます。
- ④ 伝導帯中の電子は動きやすく、かつ、長いキャリア寿命を持っています。これは、情報処理に好都合です。
- ⑤ きわめて純度の高い結晶が得られます。実際に、イレブンナイン(99.999999999%)以上の高純度結晶が得られています。

■図2 Siの長所 (筆者作成)

一方、ゲートに負またはゼロの電圧を印加すると、電子は追い出されるのでOFF状態になります。すなわち、ゲートの入力信号でスイッチが出来ることになります。

p-MOSの場合は、半導体側のp, nおよび、印加ゲート電圧の正負が逆になります。

図3を見ると、ソース、ドレイン、ゲートとも、電極を上から取ることができるので、LSIは基本的に写真製版と同じ技術を用いて平面回路として作られます。

(次号へ続く)