

コンピュータ工学講義プリント(7月10日)

今回は半導体メモリ(半導体記憶装置)について学習する。

・揮発性メモリと不揮発性メモリ

半導体メモリは、電源を切ってしまうと記憶していた情報が失われる揮発性メモリと、電源を切っても情報が保持される不揮発性メモリに分類される。これだけ聞くと、不揮発性メモリの方が使いやすそうであるが、不揮発性メモリには、情報が書き換えられなかったり、情報を書き換えられる回数に制限があったり、情報を書き換えるのに時間がかかったり、情報の書き換えに、色々な制限が付く場合が多い。そのため、用途に応じて、揮発性メモリと不揮発性メモリは使い分けられる。通常、コンピュータシステムの内部には、揮発性メモリと不揮発性メモリの両方が使われている。

・揮発性メモリの性質と分類

揮発性メモリは、メモリ中の自由な場所の情報を、自由な順番で読み書きできる構造になっている。この様な構造のメモリを RAM(Random Access Memory)と呼ぶ。なお、揮発性メモリは全て RAM であるが、不揮発性の RAM も最近開発されつつある。

自由な場所の情報を読み書きできるという特徴から、コンピュータの主記憶装置(データベースに直接つながっている記憶装置)として使われ、プログラムや、データなどを記憶するのに使われる。

電源を消してしまうと記憶を保持できない欠点があるので、通常は、コンピュータの起動時に、必要なプログラムやデータを、ハードディスク(HDD)や、後述する ROM などから転送して使う必要がある。

パソコンの起動に長時間かかり、その間ハードディスクのアクセスランプが光りっぱなしになっているのを経験したことがあるだろう。それは、起動に必要なプログラムやデータをハードディスクから RAM に転送するのに時間がかかっているのが、主な原因である。

揮発性メモリは、後述する SRAM と DRAM に分類できる。

・SRAM

SRAM(Static Random Access Memory)は RS-FF を IC の中に集積したものである。1つの RS-FF で1ビット記憶できるので、記憶したいビット数と同じ数の RS-FF を集積する必要がある。

図1は、MOSFET6個で構成した CMOS の SRAM セルの回路図である。セルとは、最小の記憶単位(SRAM の場合は1ビット)を記憶するための回路の事である。

$Q_1 \sim Q_4$ の4つの MOSFET が RS-FF を構成しており、1ビットの情報を記憶する。この RS-FF にアクセス(読み出しまたは書き込み)する場合は、ワード線(図1の WL)とビット線(図1の BL と \overline{BL})を使い、操作するワード線とビット線の交点のセルにアクセスする。

図2は、SRAM のセルが、半導体のチップ上でどのように配置されているかを示した図である。この図のセル A にアクセスする場合、WL1、BL1 および $\overline{BL1}$ を使う。またセル F にアクセスするには、WL2、BL3 および $\overline{BL3}$ を使う。

セルから情報を読み出すには、図1において WL を 1 にすると Q_5 と Q_6 が ON になり、記憶した情報 Q およびその反転の \overline{Q} がそれぞれ BL と \overline{BL} に出力される。

セルに情報を書き込むには、WL を 1 にして Q_5 と Q_6 を ON にし、その後、BL と \overline{BL} に書き込みたい情報(0 と 1 または、1 と 0)を出力する。そうすると RS-FF の Q と \overline{Q} に、BL と \overline{BL} に出力した情報が書き込ま

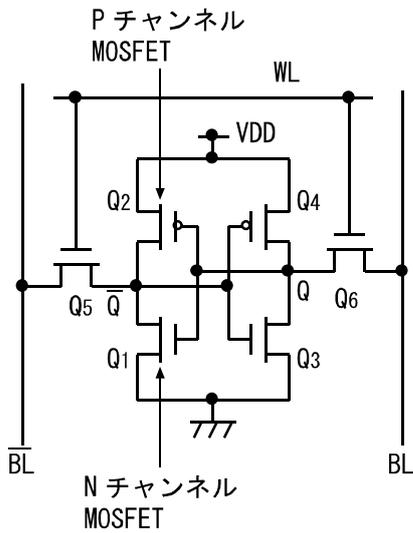


図 1、MOSFET 6 個で構成した CMOS SRAM セル

れる。その後 WL を 0 にすると、書き込んだ情報を保持する。

SRAM は、消費電流が少なく、高速に動作するという長所がある反面、1 ビットの記憶に MOSFET を 6 つも使用してしまうため、IC チップの面積が大きくなるという欠点がある。IC チップの面積は、製造コストを決定する重要な要素なので、ビット単価(1 ビットあたりの価格)も高い。

こういった特徴から、SRAM は、容量が少なくてもいい代わりに低消費電力性が求められるマイコンのデータ一時記憶用(変数などを記憶する)メモリや、高価になっても高速性が求められる高性能コンピュータのデータ一時記憶用メモリなどに使われる事が多い。

また、SRAM は低消費電力なため、小型電池や大容量コンデンサなどでバックアップ可能である。これらの電源と組み合わせて、不揮発性メモリの様に使われる事もある。

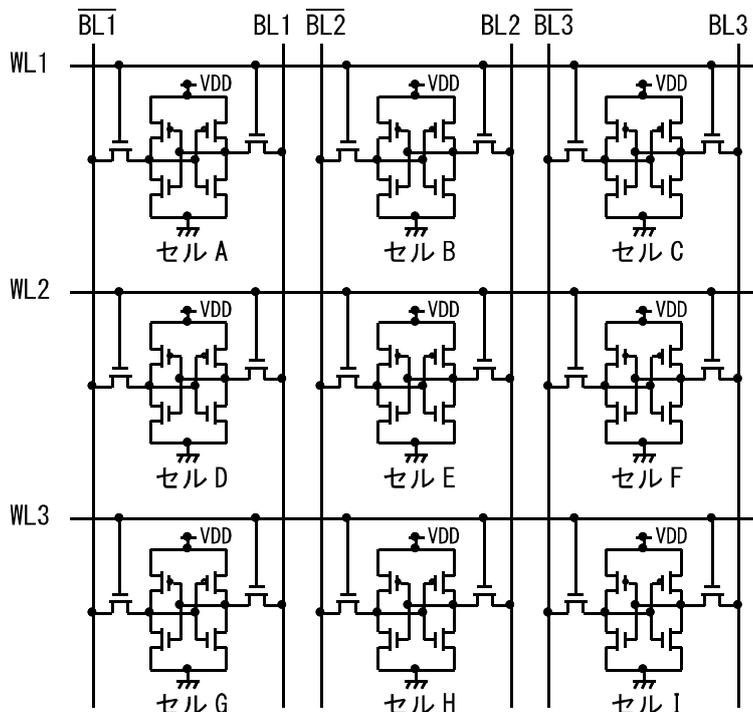


図 2、セルの平面状での配置

・ DRAM

DRAM(Dynamic Random Access Memory)は、電荷を蓄えるためのコンデンサと、そのコンデンサを制御するための MOSFET を集積したメモリである。コンデンサに電荷が溜まっている状態を 1、電荷が溜まっていない状態を 0 として情報を記憶する。

図 3 に、DRAM のセルの回路図を示す。

セルに情報を書き込むには、まずワード線(WL)を 1 にして Q₁ を ON にし、ビット線(BL)とコンデンサ(C)を接続する。その後 BL に書き込みたい情報(0 または 1)を出力する。

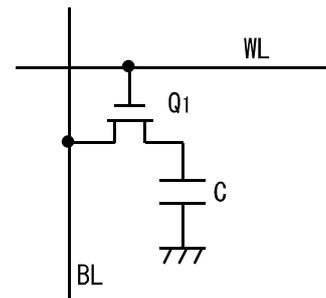


図 3、DRAM セルの回路図

図 4(a)は 0 を書きこむ際の状態を示す。BL が 0 であるため、もしコンデンサに電荷が溜まっていれば、BL に向けて放電する。その結果、コンデンサは電荷が溜まっていない状態になり、0 が書き込まれる。

図 4(b)は 1 を書き込む際の状態を示す。BL が 1 であるため、もしコンデンサに電荷が溜まっていなければ、BL から充電する。その結果、コンデンサは電荷が溜まっている状態になり、1 が書き込まれる。

情報を書き込んだ後、WL に 0 を出力すれば、図 4(c)の様に Q₁ が OFF となって、BL とコンデンサが切

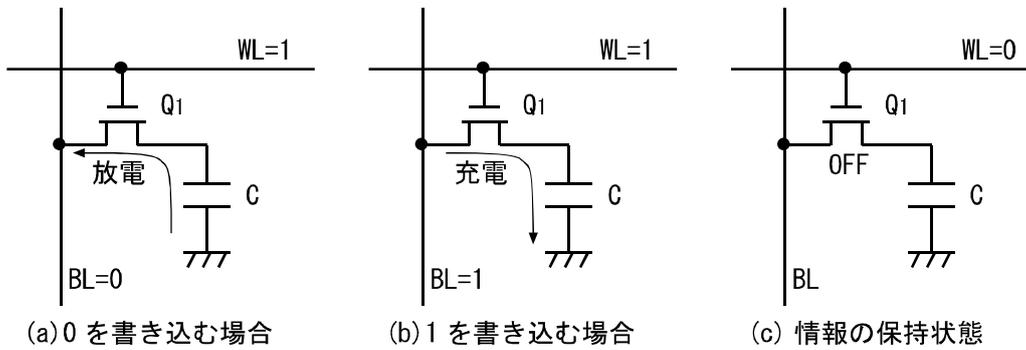


図 4、DRAM への情報の書き込みと保持

り離され、コンデンサの電荷の量は維持されるようになる。これが記憶保持動作である。

DRAM のセルの情報を読み出すには、WL に 1 を出力して Q_1 を ON にし、その時の BL の電位を調べればよい。

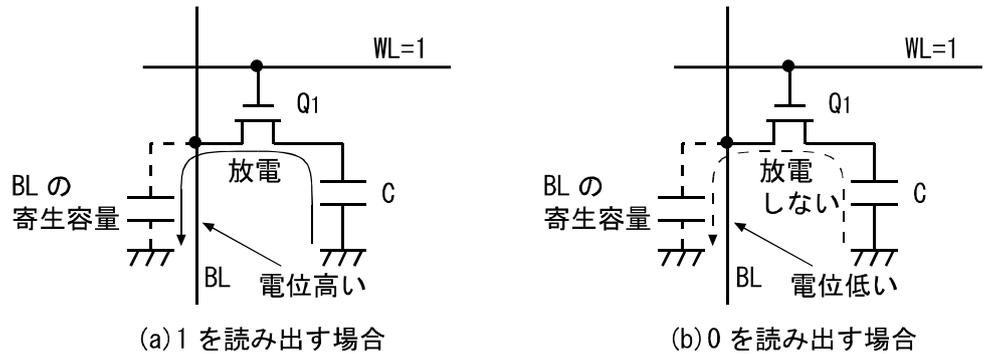


図 5、DRAM セルからの情報の読み出し

図 5(a)は 1 が書き込ま

れていた場合に、セルの情報を読み出している様子を表している。コンデンサに電荷が溜まっており、コンデンサの電圧も高いため、BL の電位も高くなる。ただし、ビット線(BL)に寄生容量があるため、コンデンサの容量 C とこの寄生容量で分圧が起こり、BL の電位は元々のコンデンサの電位よりは低くなる。また、分圧の過程で、コンデンサに溜まっていた電荷の一部が BL に対して流れ出し、コンデンサは放電してしまう。この様に、DRAM は、情報を読み出すと、覚えていた情報を忘れてしまう。これを破壊読み出しという。DRAM は、この性質のため、情報を読み出すと、その後に同じ情報を書き込む動作が必要となる。

一方で、図 5(b)は、0 が書き込まれていた場合に、セルの情報を読み出している様子を表している。コンデンサに電荷が溜まっていないため、BL の電位は高くならない。また、この時、コンデンサの放電も起こらない。

DRAM セルから情報を読み出す際に、BL の電位は、記憶していた情報が 0 か 1 かにより、わずかに変わるが、この微小な電位の変化を検出するため、センスアンプという増幅回路が各ビット線に付いている。

先ほど図 4(c)の説明で、WL に 0 を出力すれば Q_1 が OFF になるためコンデンサは BL から切り離されると説明したが、実は MOSFET の特性上、 Q_1 が OFF になった場合でも、わずかな漏れ電流が流れる。そのため、コンデンサに電荷が溜まっていた場合でも、少しずつ放電し、やがて情報が失われてしまう。

この現象に対する対策として、DRAM ではリフレッシュと呼ばれる、情報の再書き込み操作を定期的に(1秒間に数十回程度)を行う必要がある。リフレッシュとは、放電により情報が失われてしまう前に、一度情報を読み出し、同じ情報を再書き込みする作業の事である。

DRAM はリフレッシュが必要なため、その間は外部からのアクセスが受け付けられず、動作速度低下の原因になる。また、電源を入れている間は絶えずリフレッシュを行っているため、SRAM に比べて消費電流が大きいという欠点がある。

しかしながら、MOSFET 1 個でメモリセルを構成できるため、小さな面積で必要な容量のメモリを構成

でき、ビット単価が安いという長所もある。

パソコンやタブレット PC、スマートフォンなどの主記憶装置として使われている RAM は、DRAM である。これは、安価に大容量の RAM を用意する必要があるからである。

・不揮発性メモリの歴史と分類

不揮発性メモリは、電源を切っても情報が消えない性質があるので、例えば、マイコンのプログラムを格納したりするのに使われる。

歴史的に見れば、最初はマスク ROM と呼ばれる、書き換えのできないメモリが使われた。ROM とは Read Only Memory の略で、読み出し専用、つまり書き換え機能のないメモリの事である。

マスク ROM は、メモリを製造するメーカーに、書き込む情報を通知しておき、製造時に情報を書き込んでおくタイプのメモリである。(すなわち、全てオーダーメイドである) 線がつながっているか、つながっていないかの違いを、0 と 1 の記録に使うため、原理が簡単で、量産すれば非常に安価になるという利点がある。このため利点のためマスク ROM は、現在でも一部で使われている。

一方で、マスク ROM には、書き込まれている情報に誤りが見つかったら、全て破棄して 1 から作り直さなければならなかったり、少ない数のメモリを入手しようと思った場合にコストが高くついたり、入手までの時間がかかったりといった欠点があった。

マスク ROM の様にオーダーメイド品だと、開発時や少量生産時に小回りが聞かないため、工場出荷後に情報を書き込める PROM(Programmable Read Only Memory)が開発された。

最初に開発されたのは、製造時には情報を書き込んでいない状態で出荷され、ユーザーが書き込み器 (ROM ライタ)を用いて、1 度だけ情報を書き込めるタイプの PROM である。これをワンタイム PROM と呼ぶ。

ワンタイム PROM の種類にはいくつかあるが、動作の理解しやすいのはヒューズ型のワンタイム PROM である。これは、ヒューズ(規定以上の電流が流れると焼ききれる配線)を集積したもので、ユーザーが ROM ライタでヒューズを焼ききり、情報を書き込む。

ワンタイム PROM の出現により、ROM はオーダーメイド品から汎用品になり、入手性もよくなり、少量しか使わない場合でも、安価に手に入れられるようになった。しかしながら、一度しか情報が書き込めない不便さから、現在では使われる事がなくなった。

その後、ROM ライタで情報を書き込んだ後も、紫外線を照射すれば情報を消去でき、再び ROM ライタで情報を書き込みなおせる、UV-EPROM(Ultra-Violet Erasable Programmable Read Only Memory)が開発されたが、この後説明する EEPROM が開発されると、UV-EPROM は使われる事がなくなった。

EEPROM(Electrically Erasable Programmable Read Only Memory)は、電気的な信号のみで消去や再書き込みができるメモリのことである。EEPROM の登場により、情報の消去や再書き込みに、必ずしも ROM ライタなどの特殊な装置が必要なくなり、EEPROM を組み込んだ基板上での情報の書き換えが可能になった。しかし、100 回~10,000 回程度書き換えると、それ以上の書き換えができない事や、書き換え時間が RAM に比べてかなり長いなどの制限があるため、RAM を置き換える事はできず、書き換え頻度の低い用途に限定して使われている。

EEPROM には、1 バイト単位で消去や書き換えができるものもあるが、数百バイト以上のメモリセルのブロックで消去用回路を共有して、ある程度まとめて情報を書き換えなければならない不便さと引き換えに、集積度を上げ、ビット単価を下げたものもある。これをフラッシュメモリと呼ぶ。

フラッシュメモリは、不揮発性の半導体メモリの中では群を抜いてビット単価が安く、従来はハードデ

ディスク、磁気テープ、光ディスクなどを利用していた分野にまで利用されるようになって来た。諸君も、昔、動画はビデオテープや DVD に、音楽は CD などに記録していたのが、最近では全て USB メモリや SD カードなどに記録できるようになっているのを経験しているだろう。USB メモリや SD カードにはフラッシュメモリが使われている。

さらに最近では、不揮発性の RAM が開発されてきており、将来はフラッシュメモリや揮発性の RAM を置き換えてしまうのではないかと期待されているが、現状では、まだ普及しているとはいえない状況である。

次の項で、最近多用されており、マイコンのプログラムの記録にも使われているフラッシュメモリの動作原理について説明する。

・フラッシュメモリ

普及しているフラッシュメモリには、NOR 型と NAND 型の 2 種類があるが、ここでは、プログラムの記憶用にマイコンに内蔵されている NOR 型のフラッシュメモリを中心に説明する。

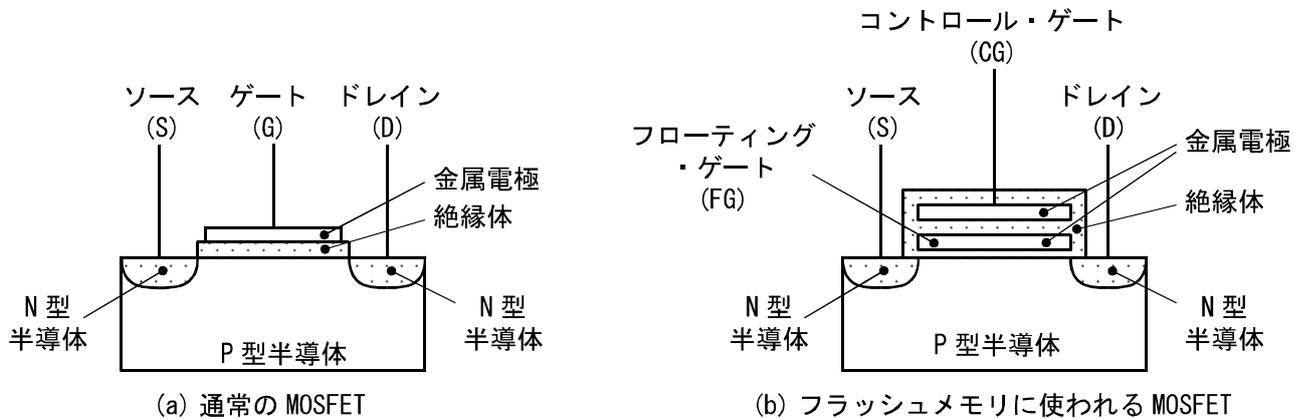


図 6、通常の MOSFET とフラッシュメモリに使われる MOSFET の構造上の違い

フラッシュメモリには、フローティング・ゲートと呼ばれる、特殊なゲートを持った、MOSFET を、情報の記憶に使う。

図 6 は、通常の N チャンネル MOSFET と、フラッシュメモリのセルとして使われる N チャンネル MOSFET の構造を比較した図である。図 6 (b) を見ると分かるように、フラッシュメモリの MOSFET は、コントロール・ゲートとフローティング・ゲートの 2 種類のゲート電極があるのが特徴である。フローティング・ゲートの方は、完全に絶縁体に包まれており、外部電極につがっていない。

また、フローティング・ゲートと P 型半導体の間の絶縁体の層が、非常に薄くできている(数 nm~十数 nm)のも特徴である。(絶縁層が薄いのは、後述するトンネル電流を流す上で必要になる性質である)

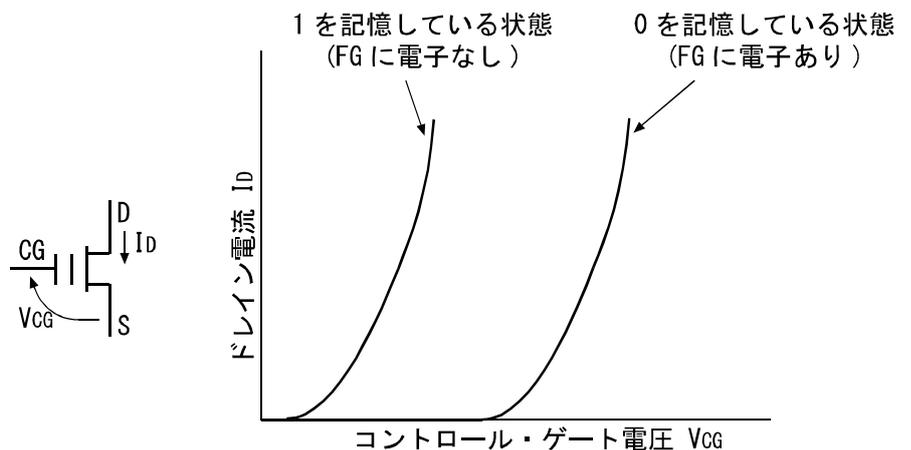


図 7、フローティング・ゲートの電子の有無による特性の変化

NOR 型フラッシュメモリでは、フローティング・ゲートに電子が溜まった状態を 0、電子が溜まっていない状態を 1 として、情報を記憶する。MOSFET はゲート近傍の電界によって、ドレイン・ソース間の電流を制御するが、フローティング・ゲートに電子が溜まると、その電子が作る電界の影響で、図 7 に示すように、MOSFET の特性が変わる。フローティング・ゲートに電子が溜まっており、0 を記憶している状態では、1 を記憶している場合よりも高くまでコントロール・ゲートの電圧を上げないと、ドレイン電流が流れない事が分かる。

図 8 は、NOR 型フラッシュメモリのセルが、どのように半導体チップ上に配置されているかを示した図である。

情報の読み出し時には、1 つのビット線と 1 つのワード線の電圧を上げ、ソース線を GND に接続する。

電圧を上げたビット線とワード線の交点にある MOSFET が選択されるが、その MOSFET が 1 を記憶していれば、ビット線に電流が流れる。選択された MOSFET が 0 を記憶していれば、ビット線に電流は流れない。

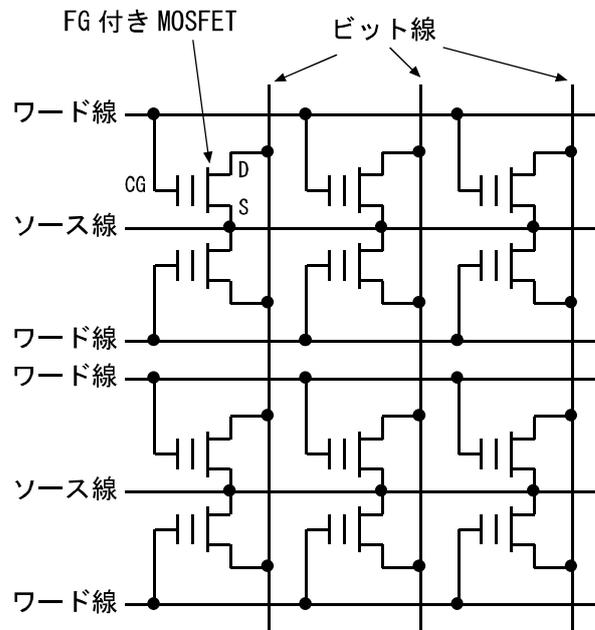


図 8、NOR 型フラッシュメモリのセルの配置

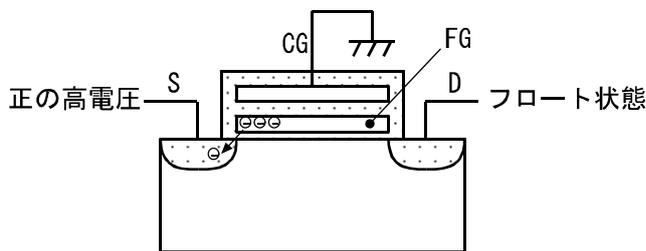


図 9、消去動作

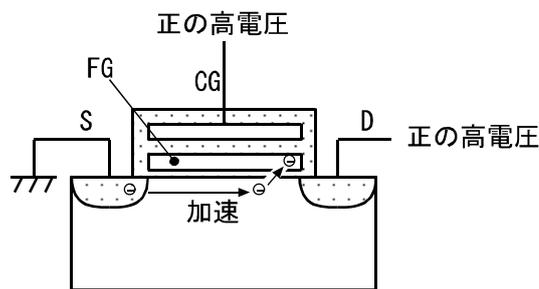


図 10、書き込み動作

NOR 型フラッシュメモリに情報を書き込む際には、まず現在書き込まれている情報を消去し、その後に情報を書き込むという 2 つのステップが必要である。

情報を消去するには、図 9 に示すように、ソースに正の高電圧をかけ、コントロール・ゲートは GND に接続し、ドレインはフロート状態(どこにもつながっていない状態)にする。そうすると、量子力学的な効果により、ソースとフローティング・ゲート間にトンネル電流と呼ばれる電流が流れ、フローティング・ゲートに溜まっていた電子はソースに吸収される。なお消去動作は、一つのセルに対して行われるのではなく、消去ブロックと呼ばれる、まとまった数のセルの単位で行われる。この消去動作により、消去ブロック中の全てのセルが、1 を記憶している状態になる。

情報を書き込むには、0 を書き込みたいセルにおいて、図 10 に示すように、コントロール・ゲートとドレインに正の高電圧をかける。ソースは GND に接続する。そうすると、ソースからドレインに向かって電子が加速していき、高い運動エネルギーを持った電子(これをホット・エレクトロンと呼ぶ)の一部が絶縁層の障壁を越えてフローティング・ゲートに飛び込む。この様にしてフローティング・ゲートに電子を溜め、1 を書き込む。情報の書き込み時は、高電圧をかけたビット線(ドレインに接続)とワード線(コントロー

ル・ゲートに接続)の交点の、1つのセルに対して、書込み操作が行われる。

以上の様な原理で動作する NOR 型フラッシュメモリは、NAND 型フラッシュメモリと比べると信頼性が高く、また 1 バイトごとに情報を読み取れるという利点がある。1 バイトごとに情報が読み取れると、マイコンのプログラムを実行する際に、一度プログラムを RAM に転送してから実行する必要がなくなり、その分コストが下がったり、起動が速くなったりする利点があるため、プログラム用メモリとして、マイコンに内蔵される場合が多い。

NAND 型フラッシュメモリは、NOR 型フラッシュメモリよりも構造が複雑なので、詳しい説明はしないが、NOR 型に比べて高密度にメモリセルを実装でき、ビット単価が安いというメリットがある。そのため、スマートフォンやタブレット PC の補助記憶装置や、デジタルカメラなどの記憶装置として、よく使われる。USB メモリや SD カードなども NAND 型フラッシュメモリを使っている。

一方で、NAND 型フラッシュメモリは、NOR 型のように 1 バイトずつ情報を読み出す事ができず、あるまとまったバイト数の情報を一度に読み出してしまう。よって、コンピュータのプログラムを格納した場合は、一度 RAM に転送してから実行する必要が生じる。(コンピュータのプログラムを動作させるには、その動作に合わせて、実行する命令を一つずつ読み出す必要があるため)

NOR 型にせよ、NAND 型にせよ、フラッシュメモリは、メモリセルに使う MOSFET のフローティング・ゲートが完全に絶縁体に囲まれているため、長期間電子を閉じ込めておく事が可能である。そのため、DRAM の様なリフレッシュ動作も不要で、不揮発性メモリとして使えるのである。ただし、年単位での長期で観察すると、わずかながら電子が漏洩するので、情報を保持できるのは 10 年程度と言われている。

また、フローティング・ゲートに電子を出し入れする際に、電子が通る絶縁層が少しずつ劣化するため、書き換え可能な回数は 100~10,000 回程度である。頻繁に情報を書き換える用途には、フラッシュメモリは向いていない。