

1.2 ムーアの法則

1.2.1 ムーアの法則*

ムーア^{*5}の法則 (Moore's Law) とは、集積回路におけるトランジスタの集積密度は、18~24 か月ごとに倍になる、という経験則である。

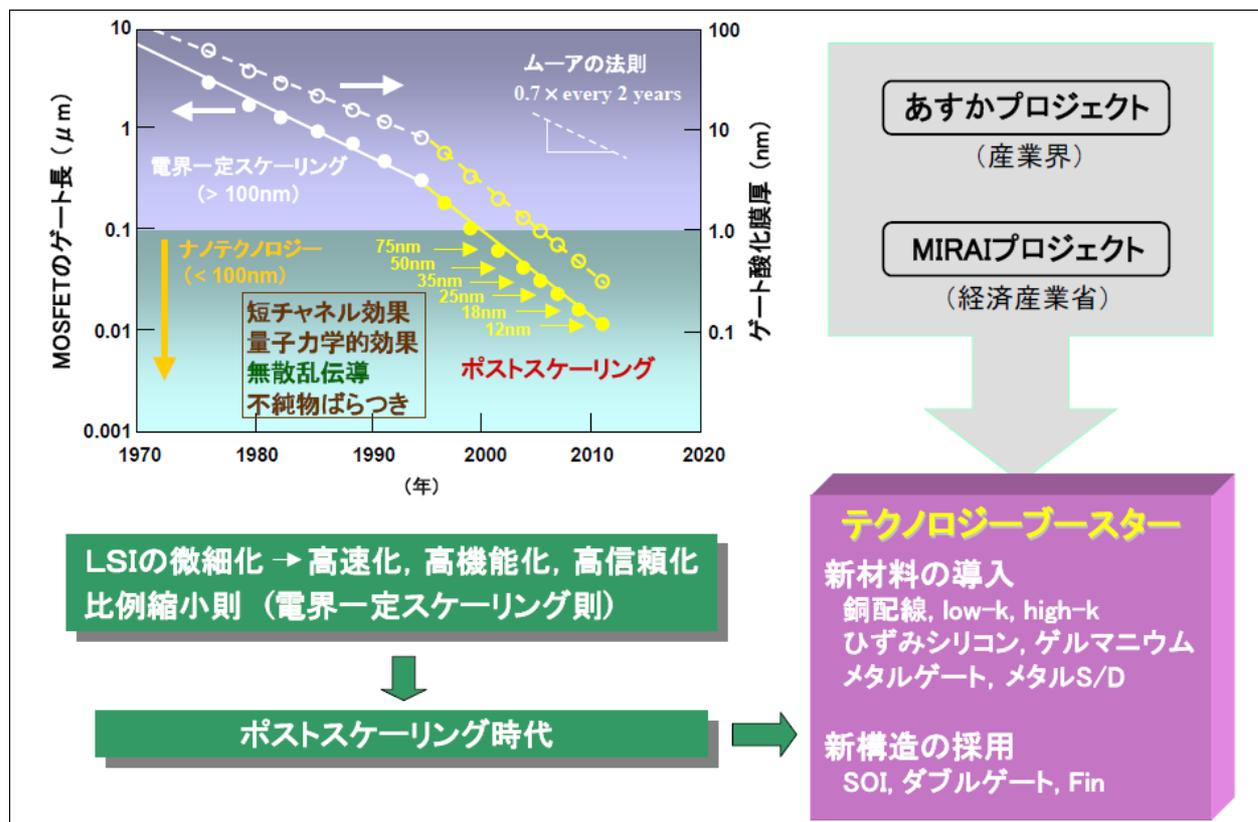


図7 MOSFETの微細化

ムーアの法則は、ゲート長・酸化膜厚が約2年ごとに0.7倍にスケールダウンすると言い換えることができる^{*6}。つまり、回路線幅の微細化により半導体チップの小型・高性能化が進むという意味で、半導体業界では長年にわたり、技術開発のロードマップ(指標)としてきた。しかし近年では、微細化が原子レベルに近づいてきてしまい、ムーアの法則は通用しなくなってきている。

・あすかプロジェクト

SoC(System on a Chip)の開発に必要なデバイスを製造するための技術確立を目指して発足した、民間主体の半導体プロジェクトの名称。2001年4月に正式スタートした。

・MIRAIプロジェクト

MIRAIプロジェクトとは、半導体技術に進展を目指して産官学が連携し発足した国家プロジェクトの名称である。

^{*5} Gordon E. Moore: 米国の科学者・技術者で、世界最大の半導体メーカー、インテルの共同創業者。

^{*6} トランジスタ面積は0.7倍の2乗, $0.7 \times 0.7 = 0.5$ 倍となり、集積密度が倍になる。

1.2.2 テクノロジーブースター

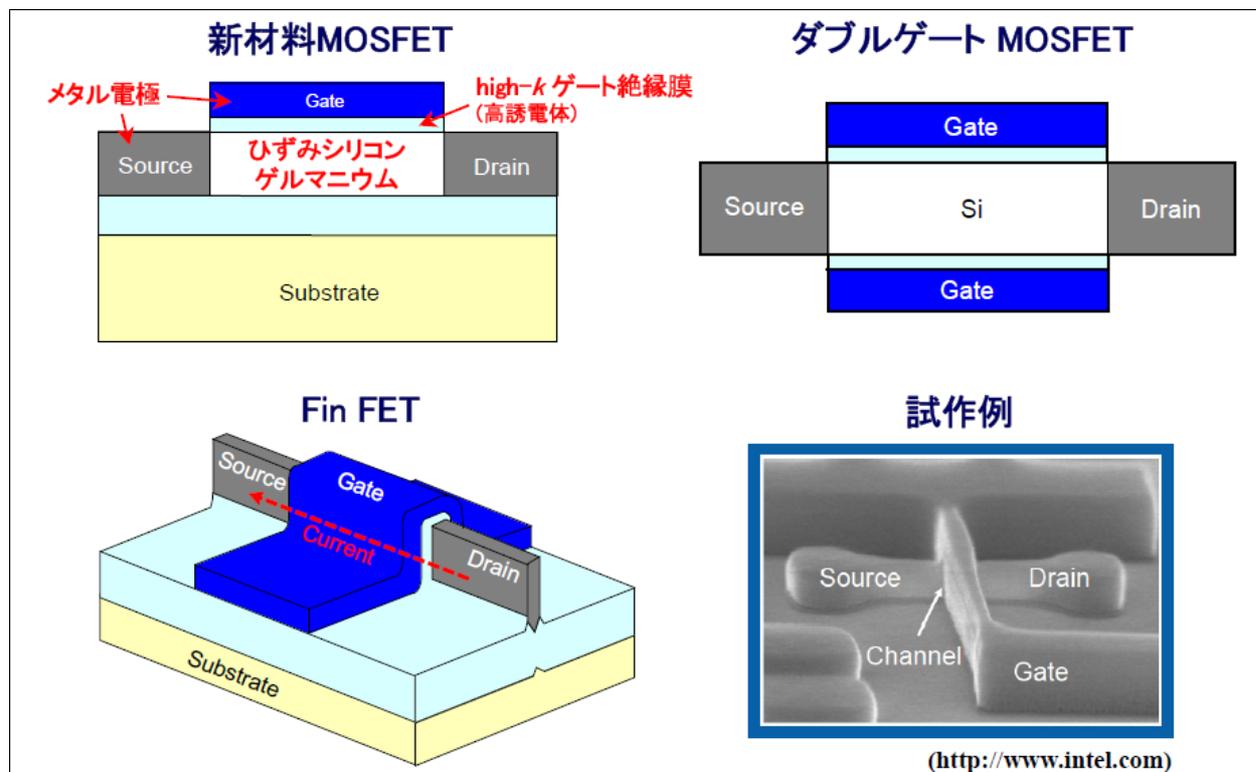


図8 テクノロジーブースター

テクノロジーブースター (technology booster) とは、新構造や新材料の導入により半導体デバイスの高性能化を図る技術である。2003年に作成された ITRS^{*7}で、従来のスケーリングによる CMOS 高性能化を維持するために、新たなトランジスタの性能向上法であるテクノロジーブースターの導入が提案された。

テクノロジーブースターにはいくつかの技術があり、主要なものとして以下が挙げられる。

- ① マルチゲート MOSFET：チャネルを立体化し、それを覆うようにゲート電極を形成する技術
- ② 歪 Si：トランジスタを構成する Si 膜にひずみを加えることで LSI の性能を引き上げる技術
- ③ メタルゲート：今まで SiO_2 を使っていた FET のゲートの素材に金属を用いる技術

スケーリング則による性能向上は飽和するので、性能を向上させる各種技術 (テクノロジーブースター) が開発されている。しかし、開発費がかかる割りに 1 世代限りの性能向上であり、効果も従来のスケーリング則を上回るものではない。

^{*7} ITRS(International Technology Roadmap for Semiconductor)：国際半導体技術ロードマップ

1.2.3 短チャネル効果 *

短チャネル効果 (short channel effect) とは、ゲート長 (およびチャネル長) の縮小に伴って顕在化してくる電気的特性の劣化である。ソース、ドレインの接近に伴ってドレインの効果がソースにまで及ぶことに起因し、具体的には、ゲートしきい値電圧の低下、ドレイン電流立ち上がりの低下 (S-スロープの増大)、および、スタンバイ漏れ電流の増大などの集積回路では致命的な問題が発生する。

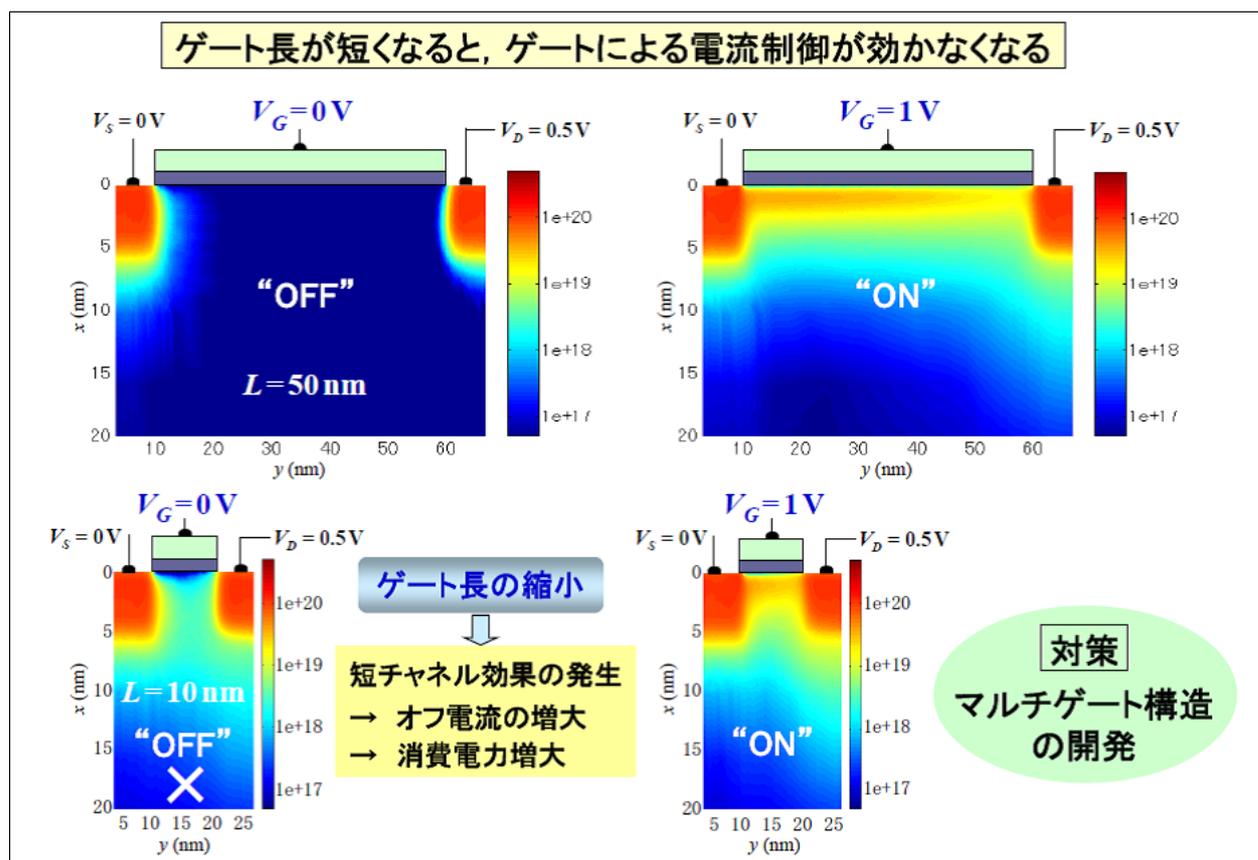


図9 短チャネル効果

半導体の性能向上はスケーリング則に従い、微細化が進められてきた。しかし、現在ではその大きさが原子・分子スケールにまで到達しつつあり、様々な問題が顕在化してきている。短チャネル効果はそのうちの一つであり、ゲート長が短いためにゲート電圧が0Vのときにも電流が流れやすくなってしまふ現象である。これにより消費電力の増大などが起こるため、短チャネル効果への対策を行う必要がある。短チャネル効果への対策の一つとして、マルチゲート構造がある。マルチゲート構造にすることで、ゲート電極によるチャネルの制御が容易になるため、短チャネル効果の抑制に繋がる。

1.2.4 量子力学的効果

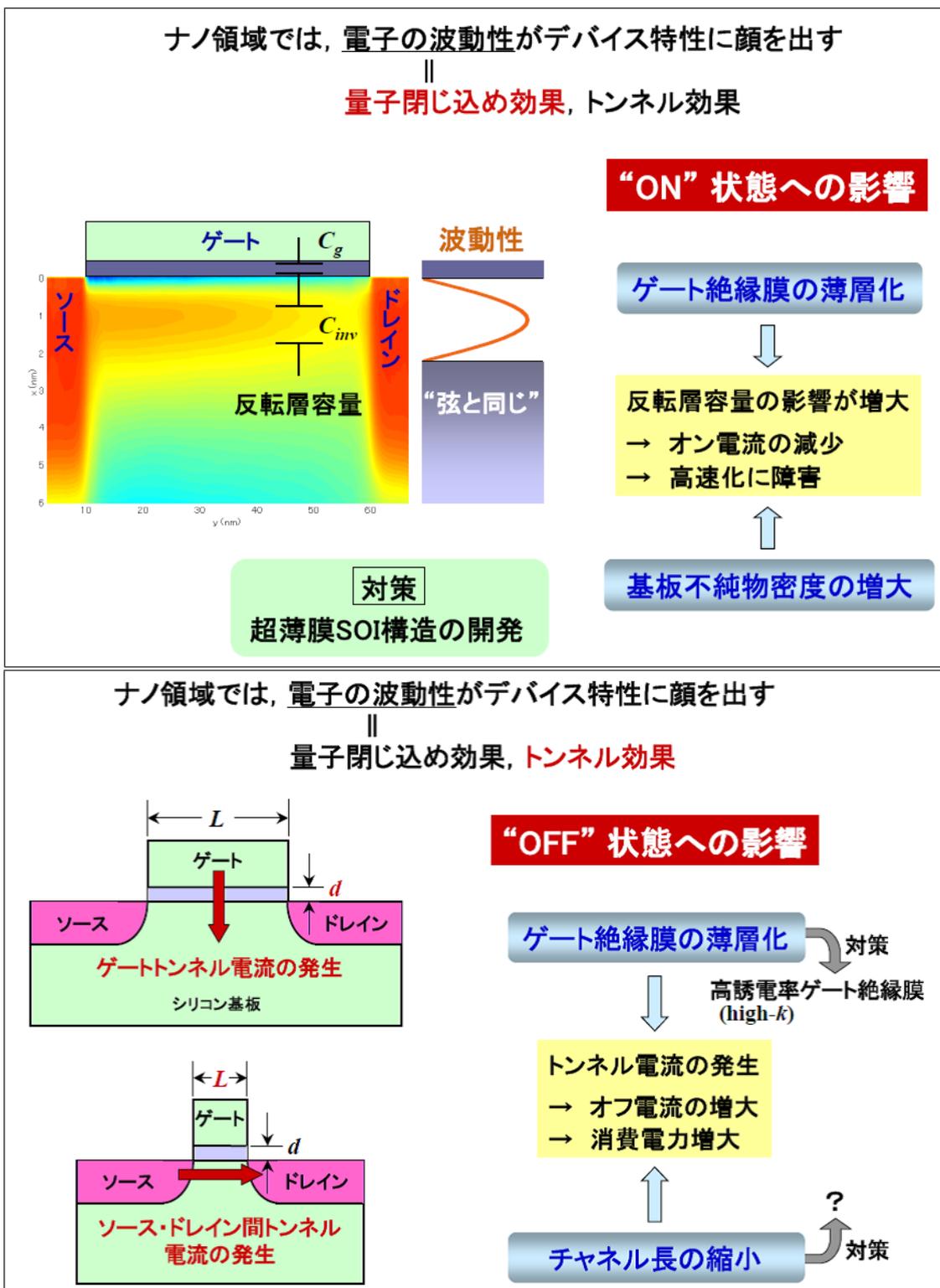


図 10 量子力学的効果

1.2.5 バリスティック伝導*

電子が格子振動や不純物などで散乱されずに結晶内を通り過ぎる現象を「バリスティック伝導 (ballistic conduction) *8」と呼ぶ。半導体の微細化技術によって実現し、これにより高いパフォーマンスが期待される。

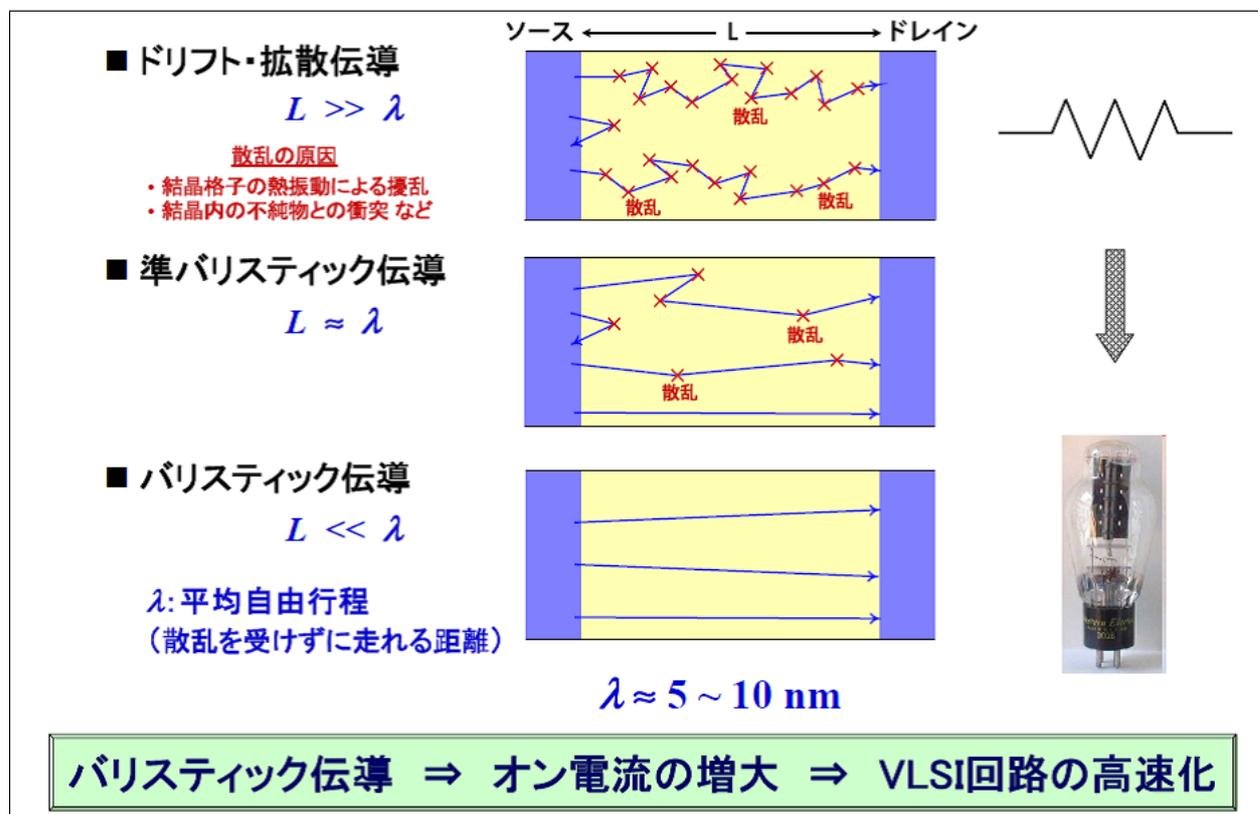


図 11 バリスティック伝導（無散乱伝導）

- ・ドリフト：半導体中のキャリアが電界により移動する現象のこと。
- ・拡散伝導：拡散現象により半導体中のキャリアが移動する現象のこと。
- ・準バリスティック伝導：平均自由行程が、電子が運動する経路の長さと同じときに生じる。
- ・バリスティック伝導：電子が散乱されることなく輸送されるとき電気伝導。
 不純物などの散乱体がなく、平均自由行程が、電子が運動する経路の長さに比べて長くなる時に生じる。

半導体の微細化が進むにつれて、短チャネル効果や量子力学的効果などの問題点も顕在化し始めたが、その反面新たなメリットも出てきた。そのうちのひとつがこのバリスティック伝導であり、これによりスイッチング速度の速いトランジスタが実現できる。

*8 ballistic：弾道。

1.2.6 新材料の導入

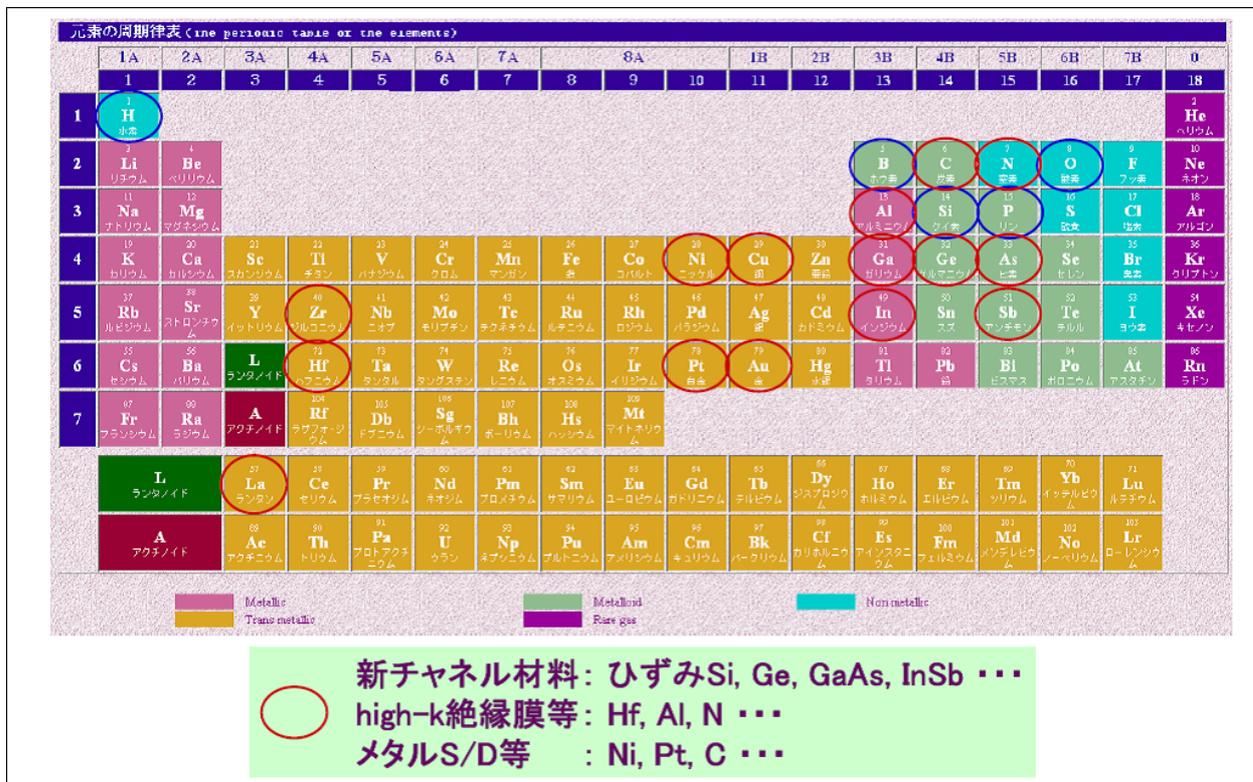


図 12 新材料の導入

ここまでのまとめ

- ① $1\text{\AA}=0.1\text{nm}$: 分子, 原子スケールの大きさ. 1nm : DNA. 10nm : たんぱく質...
- ② 電界一定スケール: 素子の微細化によって速度, 集積度, 消費電力の性能が向上する.
- ③ ムーアの法則: ゲート長・酸化膜厚が約 2 年ごとに 0.7 倍にスケールダウンする.
- ④ 短チャネル効果: ゲート長 (およびチャネル長) の縮小に伴って顕在化してくる電気的特性の劣化.
- ⑤ バリステック伝導: 電子が格子振動や不純物などで散乱されずに結晶内を通り過ぎる現象.

2 半導体評価技術

2.1 AFM

2.1.1 AFM とは

原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope, AFM) は走査型プローブ顕微鏡 (SPM) ^{*9}の一種であり、その名の通り、探針と試料に作用する原子間力を検出するタイプの顕微鏡である。

原子間力顕微鏡は、カンチレバーの先端につけた絶縁性の探針と試料表面に働く原子間力を検出することにより、表面形状を観測する。導電体、絶縁体、半導体など、様々な物質の表面形状の観測が可能である。

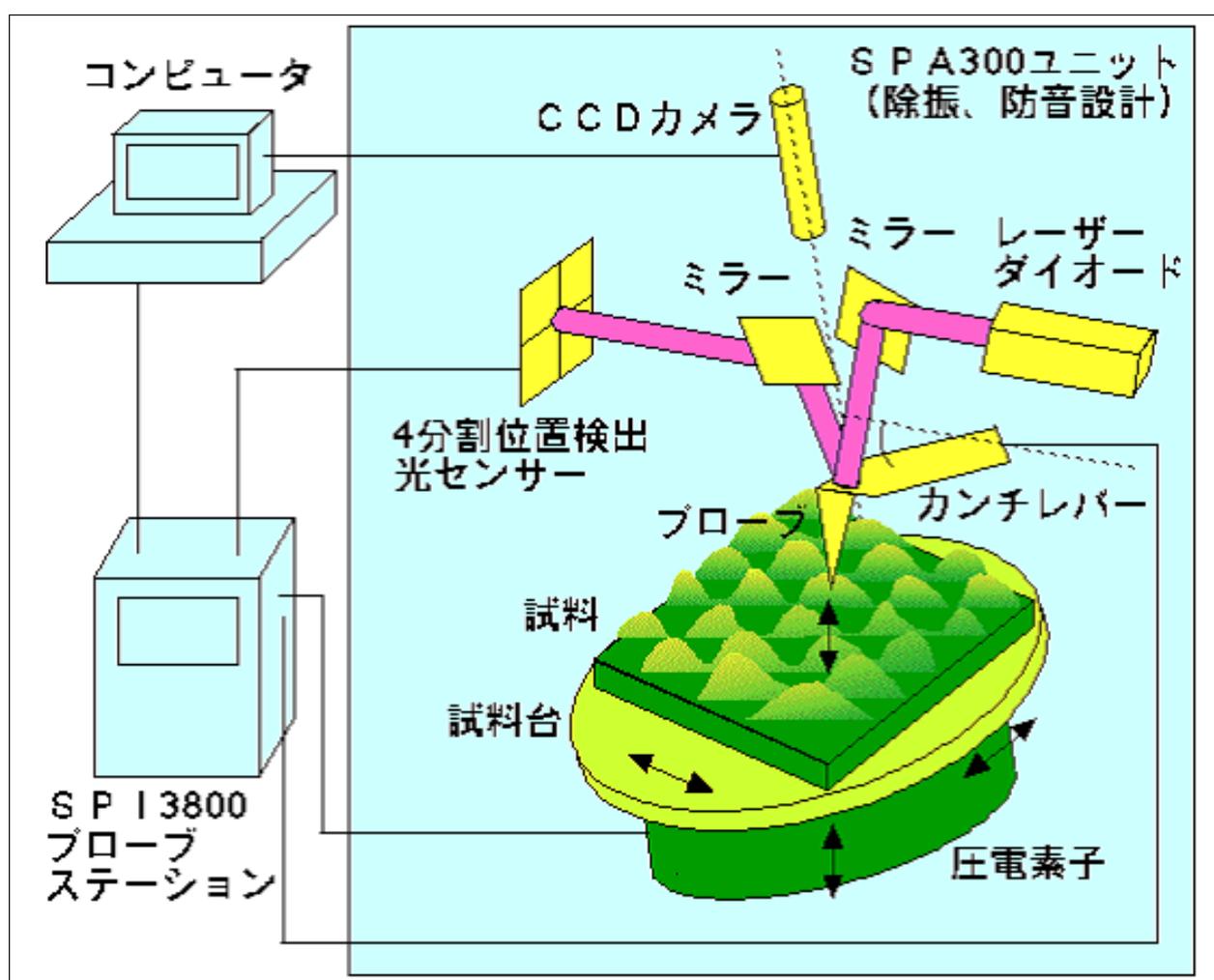


図 13 原子間力顕微鏡の構成図

^{*9} 走査型プローブ顕微鏡 (Scanning Probe Microscope, SPM) は、先端を尖らせた探針を用いて、物質の表面をなぞるように動かして表面状態を拡大観察する顕微鏡の種類である。実際の例としては、表面を観察する際、微小な電流 (トンネル電流) を利用する走査型トンネル顕微鏡 (STM) や AFM などをはじめ、数多くの種類がある。

2.1.2 AFM の測定原理

先端の鋭いカンチレバー (探針) を用いて、試料表面をなぞる、または試料表面と一定の間隔を保ってトレースし、その時のカンチレバーの上下方向への変位を計測することで試料表面形状の評価を行う。AFM にはいくつかの測定方法があり、以下に代表的な例を挙げる。

① 変位モード

変位モードはカンチレバーの変位を直接測定する方法である。変位モードにはコンタクトモード^{*10}とノンコンタクトモード^{*11}が存在する。

コンタクトモードは探針を直接試料に接触させるため、測定が容易だが、接触時に働く強い力や摩擦のために柔らかい試料やカンチレバーを損傷する可能性がある。

ノンコンタクトモードは探針を試料に接触させずに測定を行うため、試料を傷つける心配はないが、分解能が低い上、原子間力が弱い場合には正確な測定を行うことができない可能性がある。

② 振動モード

振動モードはカンチレバーを振動させ、振動特性の変化を測定する方法である。

このモードには名称が各種あり、例えば、Tapping-mode AFM、または Intermittent contact mode、cyclic contact mode あるいは dynamic force microscope と呼称されている。

2.1.3 AFM の分解能

分解能はスキャンに使うプローブの大きさや形で決まる。一般に、先端の鋭いプローブを使うほど、高分解能な AFM イメージが得られる。



図 14 AFM の分解能 (右のプローブの方が先端が鋭いため、得られるイメージの分解能は高くなる)

^{*10} コンタクトモード (Contact Mode) はカンチレバーと試料を接触させて測定を行う方法。

^{*11} ノンコンタクトモード (Non-contact Mode) はカンチレバーと試料を接触させずに測定を行う方法。

2.2 SEM

2.2.1 SEM とは

走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) は電子顕微鏡の一種である。電子線を絞って電子ビームとして対象に照射し、対象物から放出される二次電子・反射電子・透過電子・X線・カソードルミネッセンス (蛍光)・内部起電力等を検出する事で対象を観察する。通常は二次電子像が利用される。

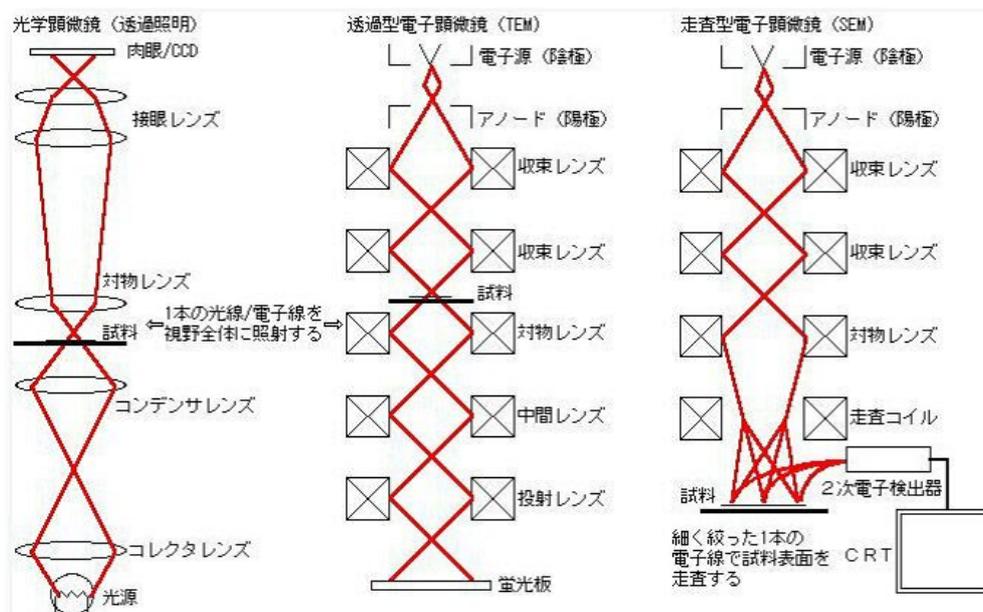


図 15 電子顕微鏡の光学系

走査型では細い電子線で試料を走査 (scan) し、電子線を当てた座標の情報から像を構築し表示する。観察試料は高真空中に置かれ、この表面を電界や磁界で絞った電子線 (焦点直径 1~100nm 程度) で走査する。走査は直線的だが、走査軸を順次ずらしていく事で試料表面全体の情報を得る。

2.2.2 線源 (電子銃)

SEM の電子線源 (電子銃) には幾つか方式がある。以前はタングステンフィラメントの熱電子銃を備えたものが多かったが、現在は電界放射型 (field emission, FE) のものも普及してきている。これは陰極^{*12}に高電圧を印加し、直下の第一陽極によって電子線を加速、続く第二陽極以降で電子線束を制御するものである。光源のサイズが小さいためよりビームを細く絞れる点、輝度が明るい点、S/N 比の高いきれいな観察像が得られる点で優れており、主に 10 万倍以上を観察する SEM に採用されている。

*12 陰極 (冷陰極) には材料としてタングステン結晶が用いられる。

2.2.3 試料の傾きと2次電子発生量の関係

2次電子の発生量は電子線が入射される面の傾きにより変化し、電子線が試料に垂直に入射されたときに最も少なく、試料に限りなく水平に近いときに最も大きくなる。

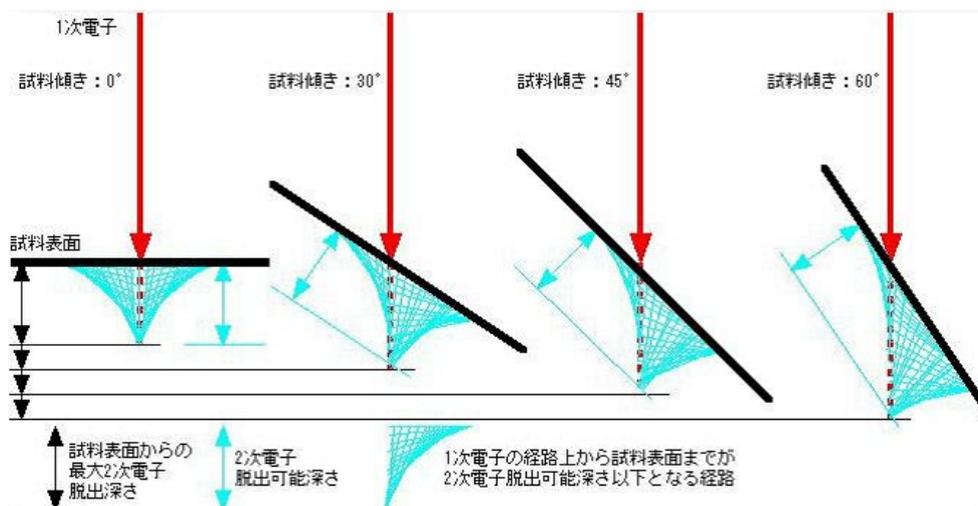


図 16 分解能と傾き

分解能^{*13}を上げるためには、試料を傾げるか、電子銃の加速電圧を強くすることで2次電子の発生量を増やすことが考えられるが、電子銃の加速電圧は強くしすぎると焼けが生じるなどの問題も存在する。

2.2.4 SEM 使用時に真空にする理由

① 電子銃の問題

電子銃には大きく分けて熱電子銃と電界放出電子銃があるが、周囲に気体があるとそれぞれ別の問題を生じ、上手く動作しなかったり、寿命が非常に短くなったりする。

熱電子銃では、酸素が存在するとフィラメントが燃えてしまう。

電界放出電子銃では、イオンが付着し、上手く電子が放出しなくなる。

② 1次電子の問題

1次電子の経路に気体が存在すると、電子は気体分子と衝突し進むエネルギーを失っていく。その結果、試料への照射電子数が減り、観察に必要な2次電子や反射電子を得ることができなくなる。

③ 2次電子の問題

通常のSEM観察に使用する2次電子は、1次電子に比べ非常に微弱なエネルギーしか持っていない。そのため試料室に気体があると気体分子との衝突によってエネルギーが失われてしまい、検出器で検出することができなくなる。

*13 電子顕微鏡の分解能は、印画紙上で見分けることのできる2点間の最小の間隔を指す。

2.2.5 チャージアップ

チャージアップ (Charge Up) は、SEM で絶縁体試料を測定している際、試料が帯電し適切な結果が得られなくなる現象のことである。

SEM では、試料に電子線を照射して発生する 2 次電子を観測している。しかし、大半の場合は 1 次電子の数よりも試料を飛び出してくる 2 次電子や反射電子の数の方が少なくなる。この結果、試料には電子がだんだん増えていき、負に帯電する。この電場の影響によって、像が白く浮き上がって見えてしまう。この現象をチャージアップという。

試料がチャージアップすると正確な観察ができないため、非導電性試料には導電性の膜を蒸着することで 1 次電子の逃げ道を作っている。

ここまでのまとめ

- ① $1\text{\AA}=0.1\text{nm}$ ：分子，原子スケールの大きさ。 1nm：DNA。 10nm：たんぱく質...
- ② 電界一定スケールリング：素子の微細化によって速度，集積度，消費電力の性能が向上する。
- ③ ムーアの法則：ゲート長・酸化膜厚が約 2 年ごとに 0.7 倍にスケールダウンする。
- ④ 短チャネル効果：ゲート長 (およびチャネル長) の縮小に伴って顕在化してくる電気的特性の劣化。
- ⑤ バリスティック伝導：電子が格子振動や不純物などで散乱されずに結晶内を通り過ぎる現象。
- ⑥ 原子間力顕微鏡 (AFM)：探針と試料に作用する原子間力を検出するタイプの顕微鏡。
- ⑦ AFM の測定モードには変位モードと振動モード (tapping mode, DFM) がある。
- ⑧ 変位モードは探針の変位を直接測定する方法で，contact mode と non-contact mode がある。
- ⑨ 振動モードはカンチレバーを振動させ，振動特性の変化を測定する方法である。
- ⑩ AFM の分解能はスキャンに使うプローブの大きさや形で決まる。
⇒ 一般に，先端の鋭いプローブを使うほど，高分解能な AFM イメージが得られる。
- ⑪ 走査型電子顕微鏡 (SEM)：電子銃を照射して，その二次電子により画像を得る電子顕微鏡。
- ⑫ SEM に用いる電子銃には熱電子銃と電界放出電子銃の二種類がある。
⇒ 前者はタングステンフィラメント，後者はタングステン結晶が材料として用いられている。
- ⑬ SEM の 2 次電子発生量は電子線が入射される面の傾きにより変化する。
⇒ 試料の傾きが大きいほど二次電子発生量は大きくなる。
- ⑭ SEM を用いる際には，電子の散乱を防ぐために真空状態にする必要がある。
- ⑮ 1 次電子が溜まり，試料が帯電して正確な観察ができない現象のことをチャージアップという。

次に学ぶこと

フォトリソグラフィ・真空蒸着などの半導体製造プロセスについて学ぶ。

- ① 洗浄からフォトリソグラフィまでの半導体製造プロセス。
- ② 成膜技術。