

特集 21世紀産業社会への挑戦
情報技術革新への更なる挑戦

林 敏 也

1. まえがき

情報技術革新として私は将来のコンピュータ像について述べてみる。

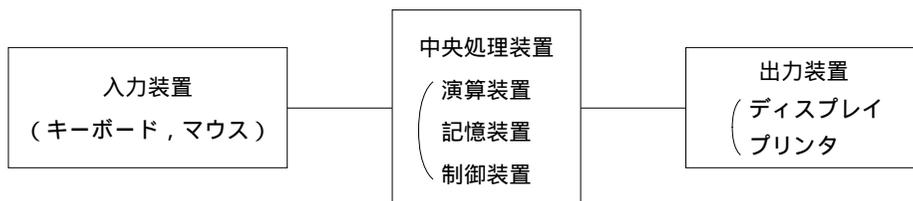


図1. コンピュータの構成

図1は現在用いられているコンピュータ特にパーソナルコンピュータ(パソコン)の構成図を示したものでご承知のようにキーボードや、マウスなどの入力装置と、演算、記憶、制御を受け持つ中央処理装置、そしてディスプレイやプリンタ等の出力装置からなりたっている。私は平成8年4月に大学からインタビューを受けた時、入力装置に音声が使われる時代がくるよとよげんした。平成9年の春、テレビで音声入力のコンピュータが障害者用にNTTで開発されたと言っていた。これは「私は豊橋創造大学の教授です。」と口で説明するとディスプレイにそのまま打ち出されると言う訳である。私はここで更に先のコンピュータ像について述べてみたい。

既にご承知のように光通信に使う光ファイバーは北海道から南西諸島にまではりめぐらされ、既に運用されている。容量と通信速度は従来 방식に比較にならない程大でその将来が大いに有望視されている。

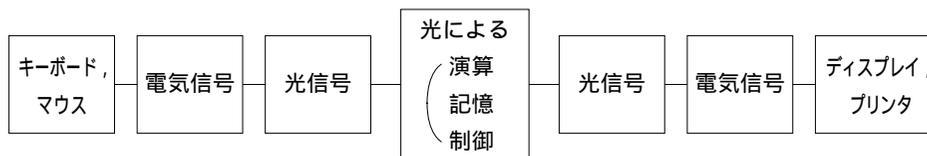


図2. 光コンピュータの概念図

図2は私の考えているコンピュータの概念図でキーボードやマウスによって入力された入力は電気信号として入力され、これを光の信号に変換して、中央処理装置に加え、ここで光処理がなされ、従来のコンピュータと同じ動作を高速、高容量で動作させるものである。図2でも明らかのように入力側では電気信号を光信号に、また出力側では、光信号を電気信号に変換することが必要である。

また光による中央処理は現在交換機用にNTTで研究されているようで本稿ではその細部については述べない。以下では光電変換に使う半導体技術について説明する。

2. Siの結晶とエネルギー帯

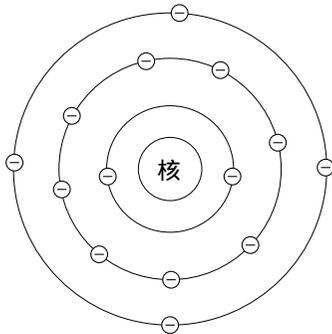


図3. Siの原子構造

図3はSi原子の模型図をBohrの理論に従って示したもので図のように核の廻りに核状構成をなして電子が飛び回っている。一番内側の軌道は2個の電子で満たされ、次の軌道は8個の電子が存在してこの軌道を満たしている。3番目の軌道には18個の電子が入り得るのであるがSiの原子番号は14であるのでこの軌道には4個の電子があるのみである。満たされた軌道の電子は原子核に結び付けられていて原子間の結合や電気伝導には関与しない。原子論によるとこの場合一番外側の軌道に8個の電子が入ると極めて安定になる。これが実現されているのが図4の(a)のような実在結晶である。これを細部にわたって眺めると図4(b)のように正四面体の4つのすみに4個の原子芯

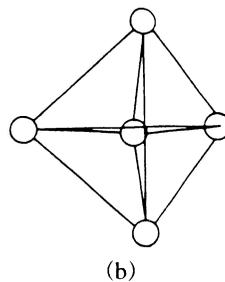
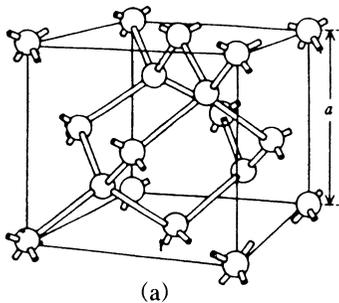


図4. Siの結晶構造

体の4つのすみに4個の原子芯(原子核と、満たされた軌道の電子)が位置した構造になっている。正四面体の中央にも1個の原子芯が存在し、この外の4つの電子が隣接する4つの原子芯の持つ電子1個ずつを共有して合計8個の電子を持つような形になり安定になるのである。

1個のみの原子が存在する場合には核状構成をなす電子のエネルギーや軌道半径は図5に示したように飛び飛びの一定の値を持つことはよく知られている。所が原子同士が接近して結晶を作ると図6のようにエネルギーの値が或る幅を持つようになる。これを書き直したものが図7である。斜線の部分は電子の占めうる場所、そうでない部分は電子の存在し得ない禁制帯である。斜線の部分は許容帯とよばれる。電子の存在している一番上の充満帯を価電子帯、その上の空の帯を伝導帯という。後で説明する光電変換素子に用いられる半導体

のGaAsは図4(a)と同じ構造で、ただGaとAsが交互にまじっている点異なる。

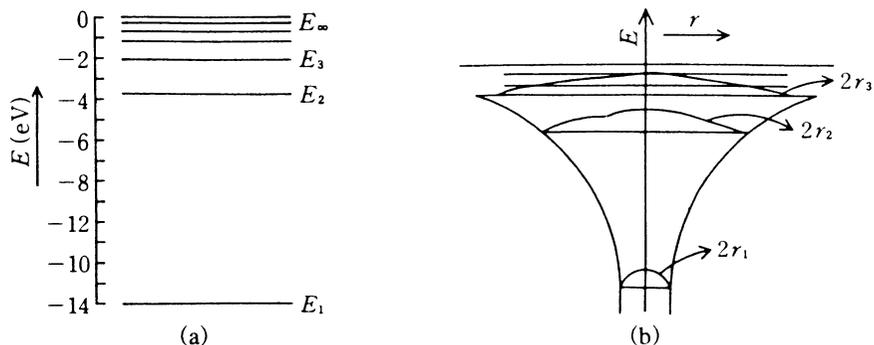


図5. 殻状構造をなす原子内電子のエネルギー(a)と軌道半径(b)

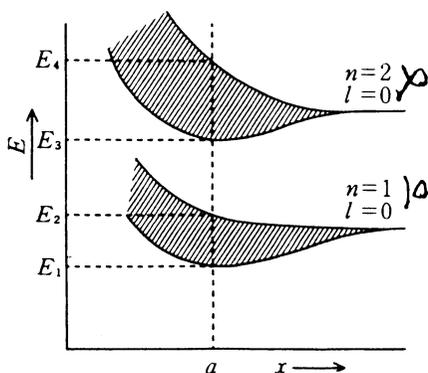


図6. 原子同士が接近した時の電子のエネルギー

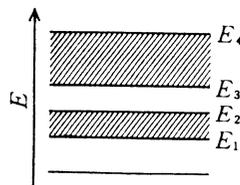


図7. エネルギー帯構造図

3. n型半導体とp型半導体

純粋にSiのみからなるSiを真性Siという。図8(a)はその平面結晶模型を示し(b)はその電気伝導の様子を示したもので、は外部から加えた電界である。図9はSiの中に5価の不純物であるAs原子(ドナー)を混入したものでこの場合には最外殻に5個の電子が存在する為、1個の電子は隣接する4個の電子と共有出来ない状態になっている。この余った電子は小さな

3 n型半導体とp型半導体

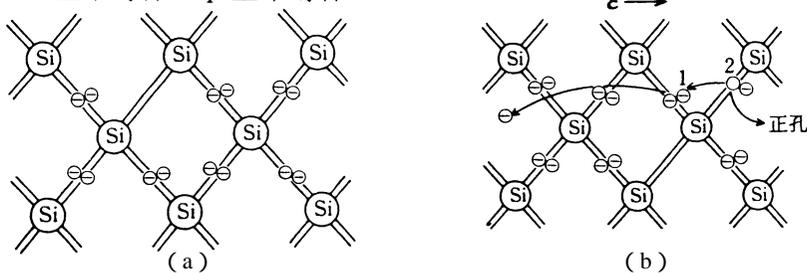


図8. 真性Si(a)と真性Siの電気誘導(b)

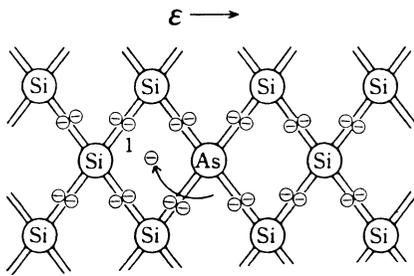


図9. n型Si

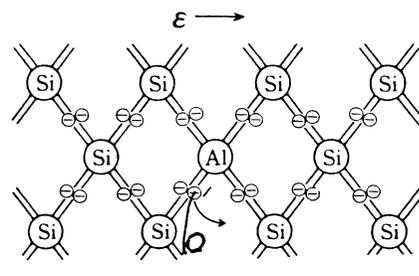


図10. p型Si

熱や光のエネルギーを加えることによって容易に自由電子となり電気伝導に關与して高い導電率をしめす.このようなSiをn型Siと呼ぶ. Asの代わりにAl原子(アクセプタ)を混入すると今度は最外殻電子が3個である為1個不足した状態になっている.この場合には図10に示したように他の電子がこの空いた部分に殆どエネルギーを消費しないで移ってくる.こうなるとこのAl原子は負に帯電する.また移って電子の元居た部分が正に帯電する.この空いた部分を正孔と呼ぶ.このようなSiをp型Siと呼ぶ.

4. pn 接合

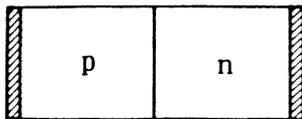


図11. pn 接合

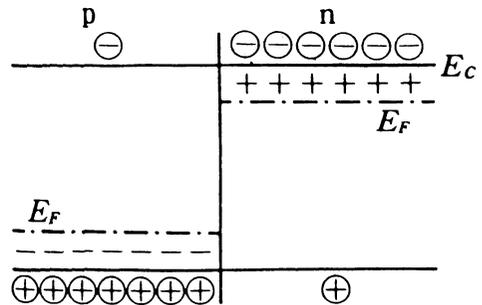


図12. pn 接触直後のエネルギー帯構造図

図11はp型Siとn型Siが界面を介して接続されている状態を示したもので,これをpn接合と呼ぶ.pn接合形成直後のエネルギー帯構造図は図12のとおりでp型領域の価電子帯には多くの多数キャリアである正孔が存在し,n型領域の伝導帯には多数の電子(多数キャリア)が存在する.相互に濃度分布に差があるからp領域の正孔はn側へ,またn領域の電子はp側へ向かう.その結果接合面近くのドナーイオンとアクセプタイオンが空間電荷として相たいたることとなり,この部分に電界,従って電位差(拡散電位)が生じエネルギー帯構造図は図13のようになる.こうなるとp領域の正孔はn領域へ行けなく,またn領域の電子もp領域へ行けない.こうして平衡状態が形成されるのである.p側に正,n側に負の電圧をかけると図14(a)のように正孔がn側へ,またこの逆の現象も現れる.p領域へ入った電子はp側の正孔と再結合し,多くの場合光を放って消滅する.(これが発光ダイオードの原理である).n側の電

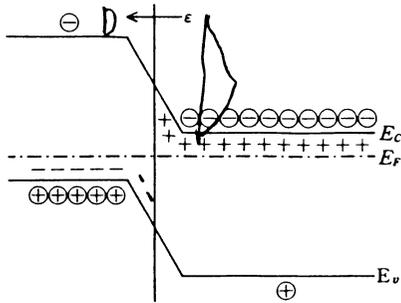


図 13. 電圧を加えない時の pn 接合のエネルギー帯構造図

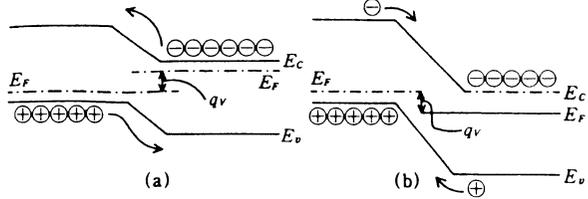


図 14. pn 接合の整流作用

子にも同様なことが起こる (a)のような向きの電圧の方向を順方向, また(b)のような場合を逆方向と呼んでいる. 図のように(b)の場合には極めて小さな電流が流れるのみで図 15 に示した整流特性があらわれる. 以上で光電変換に必要な予備知識が得られた.

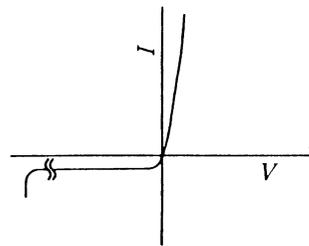


図 15. pn 接合の整流作用

5. 光電変換素子

図2で説明した光コンピュータを実現させるためには電気信号を光信号に, また光信号を電気信号に変換させる必要がある. 以下に光コンピュータに用いられると思われる光電変換素子についてのべる. 最初に入力側に用いられる電気信号を光信号に変換する素子について説明する.

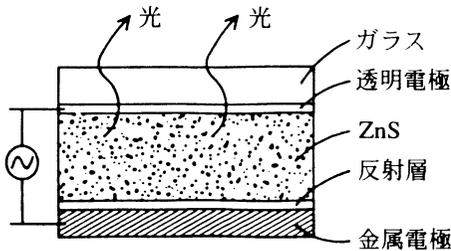


図 16. EL セルの構造

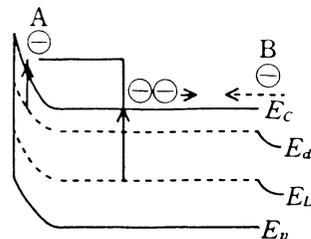


図 17. EL セルの発光機構

図 16 は EL セル (Electro Luminescence Cell) の構造を示したもので半導体として ZnS を用いている. ZnS に少量の Cu 等を加えて 900 ~ 1000 程度の高温で焼きかためたもので裏面に金属電極と光の反射層を設け ZnS の上に透明電極とガラスを設置したものである. 図のように両電極間に交流電圧を加える. 図 17 は, この場合の発光機構を示したもので Cu を添加

した ZnS のエネルギー帯構造図が示してある．図の左側には透明電極が取り付けられ，右側には光の反射層と金属電極がとりつけられている．図17は左側が負の電圧右側が正の電圧が印加されている時の状態を示したもので左側にしめされているようにドナーから，高電界によって電子が伝導帯に励起され，これが電界のために右側に加速され，途中 Cu によって禁制帯内に形成された発光中心に衝突し発光中心に存在していた電子を伝導帯へ励起し，合計2個の電子が伝導帯に形成される．この操作は各所でなされ伝導帯には多くの伝導電子が発生し，これらが右の正電極側に向かう．一方電子を放出した発光中心は空になっている．交流電圧を印加したのであるから ELセルの寸法や電源の周波数を調節して，上の過程で生じた電子群が右の電極に達したとき，電圧の極性が反転するようにしておくこと次の過程では先の電子群が左の電極に向かって進む．これらの電子は其の途中で空になったより低い発光中心に落ちる．その際，余分のエネルギーを光エネルギーとして放出するのである．この動作は繰り返され恒常的に電気信号が光の信号に変換される．

また更に多く用いられると思われる発光素子に次に述べるレーザーがある．図14で pn 接合に順方向電圧が加わると p 領域の正孔は n 領域に注入され，n 領域の電子は p 領域へ注入される．互いに他の側に注入された正孔と電子は両域の多数キャリアである電子や正孔と再結合する．即ち p 領域では注入された電子が光エネルギーを放って価電子帯の正孔と合体して消滅する．n 領域にても同じような現象がみられ電気信号が光信号に変換される．ただし Si の場合には赤外線が放射され，可視光線は発生しない．可視光線の発光は Ga, Al および As の化合物半導体でみられる．尚この発光は直流でも交流でも見られる．図18は上の原理に基づいて形成された pn 接合 GaAs レーザーで pn 接合に順方向電圧が印加され，図の鏡面から単色光が発光するのである．当初実現されたレーザーは直流では発熱の為に室温では発光しなかったが図19のように禁制帯幅の広い $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ と GaAs を図のように組み合わせると電子と

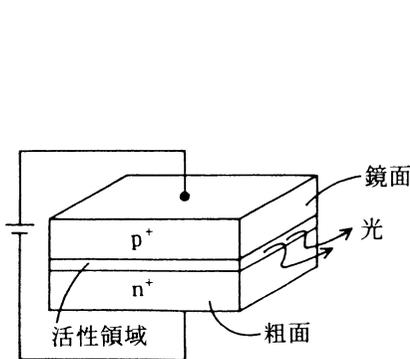


図18. pn接合レーザー

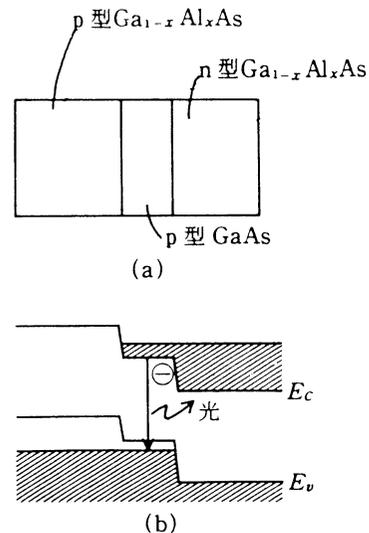


図19. 改良された化合物半導体ヘテロ接合レーザー

正孔が図のGaAsの部分に閉じ込められ、高密度になってこれらがGaAsの部分で再結合し直流、室温でも発光する。このレーザーは現在光通信に広く用いられている。

今一つの変換素子は光導伝素子である。図20は半導体の両端にオーム接触を設け、表面から光を照射すると半導体の導伝率が急に増大する為電極間の電流が光の照射信号によって変化し光の信号が電気信号に変換されるものである。図21は光の照射による導伝率の変化の様子をエネルギー帯構造図で示したもので(a)は価電子帯からの電子の励起によるもの、また(b)と(c)は夫々ドナーとアクセプタからの励起によるものである。図22はpn接合に光を照射すると図のように電子が流れて光電流を形成するものである。これは接合部に電位の傾きが存在することによるものである。この効果によって光の信号を電気信号に変換することができる。

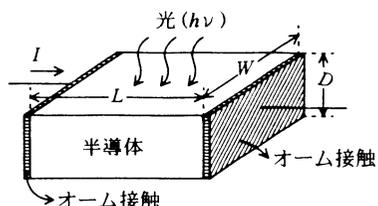


図20. 光導伝素子

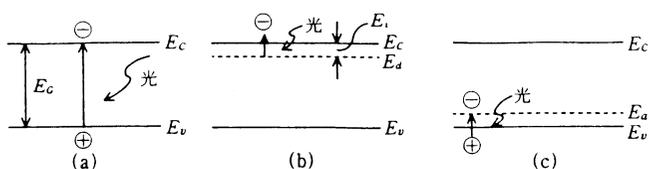


図21. 光導伝作用の説明図

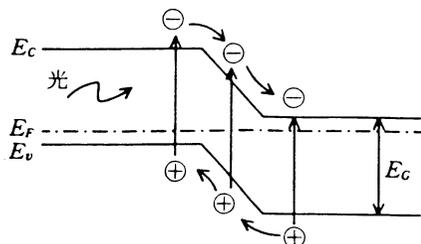


図22. 光電流の発生機構

次に光によって起電力を生ずる効果である。図23はpn接合に光を照射すると空乏層内の電界のため電子はn側へ、また正孔はp側へ流れる。その結果、図のように起電力Vが発生するものである。金属と半導体の接触部にも図24のように光起電力が発生する。こうして両信号間の交換ができる。

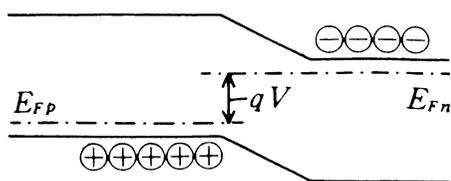


図23. pn接合による光起電力の発生

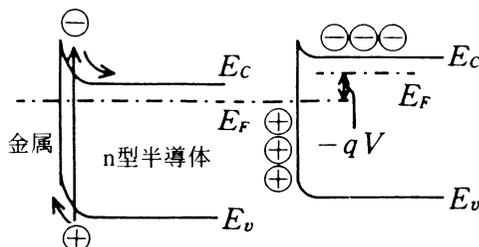


図24. 金属と半導体との接触で生ずる光起電力の発生

次にpn接合に逆方向電圧を印加し電流の流れない状態にしておき、これに光を照射すると大きな光電流が流れる。これも両信号間の変換に利用することができる。逆方向電圧を著し

く大きくしておき光を照射すると雪崩効果が発生して大電流を、しかも高速で得ることができこれは現在光通信に広く利用されている。

図25はpnp接合(ホトトランジスタ)に左側が正,右側に負の電圧を加えた様子を示しており,図の様に右側の空乏層の近くに光を照射すると正孔と電子がでて,正孔は右側へ流れて動

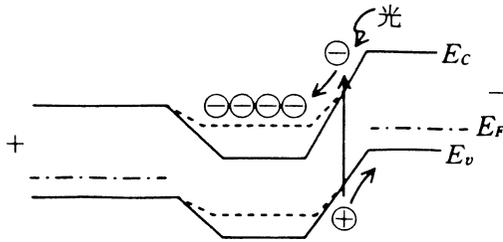


図25. pnp接合(ホトトランジスタ)の光電流の発生機構

作に関与しないが,電子は中央のn層にたまる。このためこの部分の電位がさがりエネルギー帯構造図は図の点線で示したように変化し左側のpn接合が順方向にバイアスされる。こうして大きな電流が左から右にながれることになり光電変換が可能となる。以上のように半導体を用いると容易に光電変換,従って電気と光の信号の変換ができる。

6. まとめ

5節で述べた変換素子を用いれば図2に示した光コンピュータの入出力部を形成でき,光による高速,大容量の演算,記憶,制御が可能になれば図2の光コンピュータを形成出来ると思われる。尚光による電子交換機の動作つまり,光交換機はすでにNTT等で研究されている。電子交換機は現在のパソコンと殆ど同じ働きをするものであることを考えると光コンピュータの実現も夢ではないと思われる。光集積回路の形成は勿論可能で現在製造されている。