量子材料物性第３（２００５）年　授業ノート（４）

２００５年１１月２日

金属－半導体接合

金属－金属接合

本題に入るまえに、金属同士の接合で何が起こるかを考えてみよう。異種の金属は、異なるフェルミエネルギーを持っている。フェルミエネルギーは共通尺度（真空準位）からはかられた、ものであり、それが異なっている金属を接触させると、エネルギーの高い金属の方から、低い金属の方へ電子が流れ込むことになる。

電子の流入により、２つの金属に間に電位差が生じる。この電位差は、流出する電子を引き戻す方向に作用する。最終的に、フェルミエネルギー差により流れ込む電子数とポテンシャルにより生じた力により流れ出す電子の数はバランスして、定常状態に達する。

ここまでは、電子のエネルギーレベルを言い表すのにフェルミエネルギーという言葉を用いたけれど、化学の言葉では、これは、イオン化傾向に対応する概念である。つまり、フェルミエネルギーが真空準位に近い金属ほど電子を放出してイオンになりやすいのである。

金属毎にフェルミエネルギーが異なっていることを利用したのが電池である。金属を２つ接触させてもそのままでは電位差を取り出せないけれども、電解質を挟むことにより電荷の取り出しが可能になる。また、フェルミエネルギーの差は、金属の防蝕にも使われている。鉄に対する亜鉛メッキでは、亜鉛から鉄に電子が流入し、亜鉛がイオンとして離脱して、亜鉛の腐食が進む結果、鉄の腐食を防ぐことができるのである。

金属－半導体接触

では、金属と半導体の接触では何が起こるのであろうか。ただし、ここでは、半導体は何らかかのドープがなされていて、電気が流れる状態になっているものとする。そうでないと、界面で何事かが起こっても、キャリアーのない半導体は電気を流さないので、電気的に面白いことは何も生じないのであるから。

まずは、ｎ型半導体を考えることにしよう。ｎ型半導体のフェルミエネルギーはバンドの中間よりも上側にある。実際に禁制準位で、状態が存在しないところにフェルミエネルギーがあるのは奇妙に感じるかもしれない。しかし、これは、フェルミエネルギーの物理的な意味を考えてみると、それほど奇妙なことではない。

金属において、フェルミエネルギーは、絶対０度において、占有している電子の最大エネルギーとして定義された。しかし、有限温度ではフェルミエネルギー近傍で電子のエネルギーの分布が生じ、フェルミエネルギーは、その分布の真中になる。つまり、電子を１個入れたときに期待できるエネルギー上昇分であり、物理化学の言葉で言えば電子の化学ポテンシャルに相当するものなのである。

そうだとすると、有限温度の半導体では、伝導帯にも、価電子帯にも温度とフェルミエネルギーの位置に応じた穴があり、そこに電子を１個加える場合の化学ポテンシャルは、両者を確率的な重み付をしたものになり、両者の間の、実際には準位のない場所に来てもかまわないのである。

　さて、ｎ型半導体で、半導体の方がフェルミエネルギーが低い場合を考えよう。この時

は、定義よりｎ型半導体へ金属から電子が流れ込む。ここで重要なことは、金属の方が半導体に比べてキャリア数が遥かに多いことである。このため、金属の電位はほとんど変化しない。一方で、半導体は負に帯電することになり、バンドは金属にめがけて下の方に曲がっていく。最終的には、金属から半導体の伝導帯にとぎれることなく電子がつまった状況が出現する。

一方、ｎ型半導体の方がフェルミエネルギーが高い場合には、半導体から金属に電子が流れ込む。その結果、界面近傍の半導体側にはプラスの荷電が取り残される。これは、金属から電子を引き戻すのが、金属への流入と釣り合うようになるまで続く。最終的に、金属にめがけて半導体のバンドは上方向に湾曲し、界面近傍は、プラスの不純物による電荷のみが残った状態が形成される。この領域にはマイナスの電荷は存在しないので、空乏域と呼ばれている。

ｐ型の場合には、半導体のフェルミエネルギーが高ければオーミックに、低いと空乏層のある接合になる。

オーミック接合の場合には、接合を通してキャリアーが存在するので、外部電場により、電場に比例した電流が流れる。つまり、オームの法則に従っており、オーミック接合と呼ばれている。一歩、空乏層が存在する場合には電圧の印加方向により生じることが異なってしまう。

電圧－電流特性

ｎ型半導体において、金属側をプラスとマイナスにした場合の電流電圧特性を調べてみよう。半導体側がプラス（逆バイアス）の場合、電子は半導体の電極側に引き寄せられる。ちなみに、金属、半導体ともキャリアーがあるので、電場は、キャリアーがなく、絶縁性の高い、空乏層領域のみに印加される（直流の電圧分配を考えよ）界面にある障壁の高さを実質的に０であるとすれば、外部電場は界面部分ではほとんど消費されないので、外部電場による障壁の高さ変化はない。一方、空乏層の部分は外部電場が、かかるためにポテンシャル差がさらに大きくなり、それをカバーするための空乏層の長さは長くなる。

一方、半導体側をマイナスにすると、半導体から金蔵への障壁電場は低くなり（上述したように、界面に幅があるため）、その結果として電子の流入が増加する。プラスマイナスの両方における、電圧－電場印加関係は整流特性を示すものになる。