

半導体物理のおさらい(3)

バンドダイアグラムの描き方

1. バンドダイアグラムとは？

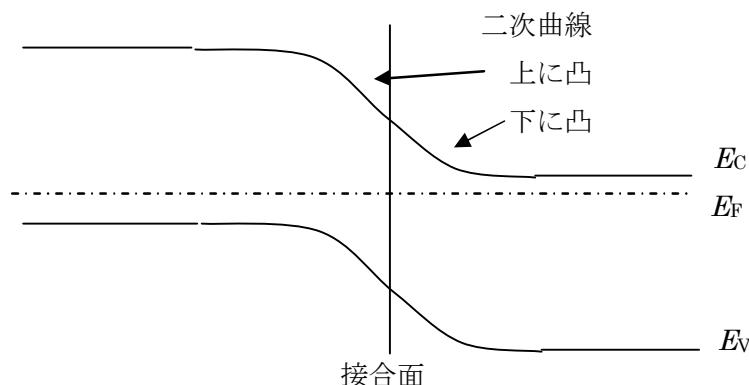
伝道帯、価電子帯を位置の関数として描いた物。半導体のほとんどの現象はバンドダイアグラムが描ければ理解できる。ここでは、一方向にのみ、構造や電界が変化している場合のバンドダイアグラムに関してその描き方の基本を学ぶ。

2. バンドダイアグラムの描き方（初心者編：pn 接合）

- i. フェルミレベル E_F を描く。（熱平衡状態では位置によらず一定）
- ii. 接合や不純物濃度の変化のある場所から十分遠いところで電子濃度、ホール濃度にあわせて伝道帯端 E_C 、価電子帯端 E_V を描く。（ $E_C - E_F$ 、 $E_F - E_V$ は n 、 p の関数として求める）
- iii. ドーピング濃度によって空乏層の厚さを推測する。
- iv. 空乏層を二次曲線で滑らかにつなぐ。ただし、正の電荷のあるところでは下に凸、負の電荷のあるところでは上に凸の二次曲線となる。（イオン化したドナーは正、イオン化したアクセプタは負の電荷をもつ。）

注意：最も重要、かつ間違いやすい点は、電荷のないところではバンドは曲がらない（直線）こと。

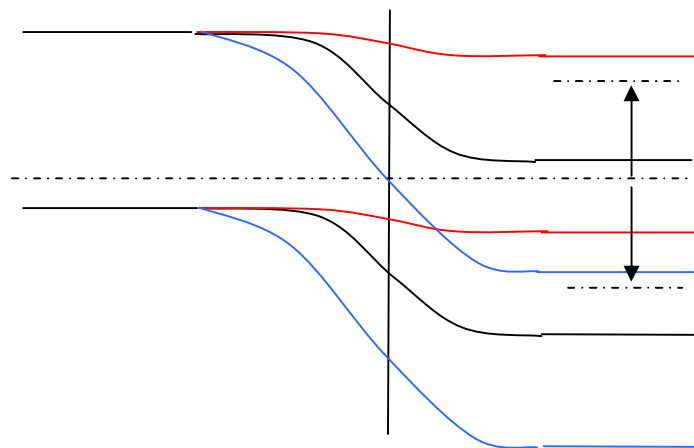
（なぜならば、ここで考えているのは構造がある方向のみに変化している一次元問題であるから。一次元のポアソン方程式を考えてみればすぐわかる。）



3. 電圧が印加された場合

- i. 熱平衡状態の図を描く。

- ii. GND のフェルミエネルギーを固定し、それに対して電圧を印加した部分のフェルミエネルギーを上下にずらす。(電子に対するエネルギー図だから、正の時下へ、負の時上へ)
- iii. 熱平衡のバインド同様に接合や構造変化のあるところから十分遠いところで伝道帯端、価電子帯端を書く。
- iv. 空乏層の厚さを推測する。(頭の中でポアソン方程式を解く)
- v. 空乏層を二次曲線で滑らかにつなぐ。



接合面

4. 注意する点
 - ・電荷のないところではバンドは直線（傾きはあってもよい）
 - ・一定の電荷のあるところではバンドは二次曲線（電荷密度が変化していれば他の曲線もありうる）
 - ・バンドは滑らかにつなぐこと（傾きが変化するときにはそこに電荷がある。不連続に傾きが変わるときはそこに δ 関数的な電荷があることを意味する）
 - ・熱平衡状態でのフェルミレベルは通常、**n** 層では伝導帯の少し下、**p** 層では価電子帯の少し上になるが濃度が十分高いと伝道帯や価電子帯の中に入ることもある。
5. 電流－電圧特性の考え方
 - 1) 電子はフェルミレベルからエネルギーの **exponential** 関数として分布している。
 - 2) バリアを越えることが可能な電子が電流に寄与する。
 - 3) 反対方向の電流も考えること。

6. 中級者向け注意

- ・イオン化したアクセプタやドナーだけでなく、電子やホールが増加すればバンドは曲がる。
- ・フェルミレベル近辺にバンド端がくると、アンドープであろうと、反対にドーピングされていても電子やホールはたまる。
- ・要は「バンドダイアグラムを描く」とは頭の中でポアソン方程式、電子密度、ホール密度の統計力学、さらにはシュレーディンガー方程式を解くこと。

練習問題

下記の問題では電荷分布も図中に+, -で示すこと。厳密である必要はないが、物理現象がわかる程度には正確に書くこと。

- 1) pn 接合について、n 層のドナー濃度を 10^{17}cm^{-3} と固定したとき、p 層の濃度が 10^{16} , 10^{17} , 10^{18}cm^{-3} の場合のバンド図を描け。(熱平衡状態とする)
ヒント:p 側 n 側の空乏層に含まれる電荷の量は等しい(電荷中性条件)。
- 2) npn 接合について以下の条件の場合のバンド図を描け。ただし、p 層、n 層の不純物濃度は 10^{17}cm^{-3} 程度とする。
 - a) n 層が十分厚く、中性領域がある場合
 - b) n 層が薄く、中性領域がない場合
- 3) 以下の場合について nin ダイオードのバンド図を描け。ただし、i 層とは不純物のドーピングされていない層である。
 - a) i 層が十分厚い場合
 - b) i 層が薄く、熱平衡状態のフェルミレベルが実現されない場合
- 4) 3)について電流-電圧特性を考えてみよ。