

10 半導体検出器

半導体検出器はエネルギー分解能が高く、飛跡検出器としても使用できるため原子物理学で重用される。

動作原理は、電離放射線が媒質を通過して形成される電子-正孔対を、電場をかけて集めるというものである。類似の原理で働く比例計数管に比べると、電子-正孔対を作るエネルギーは10分の1であるためエネルギー分解能は1桁向上し、高密度であるためストップングパワーが強い。

シリコンなどを除き、検出器は実験前に十分冷やしてやる必要がある。また、結晶体であるため、放射線によるダメージの感度が高く長期使用はできない。

10.1 半導体の基本的な性質

まずは真性半導体について扱う。しかし現実には不純物が混ざっており、それが重要な役割を果たす。

10.1.1 エネルギーバンド構造

図 10.1 は価電子帯、禁止帯、伝導帯の構造を表す。エネルギーバンドは実際には離散したエネルギー準位が密集したもので、禁止帯とは可能なエネルギー準位が存在しない領域のことを指す。結晶中の電子の波動関数が重なるためパウリの原理が働き、外側のエネルギー準位ではこのようながバンド構造が現れる。

電子は価電子帯では強く束縛され、伝導帯では自由電子として結晶中を自由に動き回ることができる。

禁止帯のエネルギーギャップは原子間の格子間隔により決定され、格子間隔は温度、密度の関数である。絶縁体はギャップが大きく、常温で自由電子は存在しない。伝導体はギャップが無く、常温で自由電子が存在するため自由に電気が流れる。半導体はその中間で、常温でわずかに自由電子が存在し、温度を下げることで導電率は下がっていく。

10.1.2 半導体中の電荷キャリア

図 10.2 は半導体の共有結合の模式図。(a) は 0K ですべての電子が結合しているが、(b) はそれより高温のため熱エネルギーにより自由電子と正孔ができている。空いた正孔に隣の電子が飛び移るのは容易であるため、正孔は正電荷のキャリアとして振る舞う。半導体では自由電子と正孔の2つが電荷キャリアとなる。

10.1.3 固有電荷キャリア濃度

安定状態での電子（正孔）の濃度 n_i は、

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) = AT^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \quad (10.1)$$

で表される。ここに、 T は温度、 N_c は伝導帯の状態数、 N_v は価電子帯の状態数、 E_g は 0K でのエネルギーギャップ、 k はボルツマン定数。 N_c と N_v はフェルミ-ディラック統計から計算され、 $T^{3/2}$ で変化する。よって、温度に依存しない定数 A を用いると、 n_i は (10.1) の右辺のようにかける。

300K での n_i の典型的な値は、Ge で $2.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ と大きい、Ge 原子の数が $10^{22} \text{atoms/cm}^3$ であるため、 10^9 個に 1 個の Ge が励起していることになる。

10.1.4 移動度

電場 E 中の電子，正孔のドリフト速度は，移動度 μ_e, μ_h を用いて，

$$v_e = \mu_e E, v_h = \mu_h E \quad (10.2)$$

と表される． μ は E と T の関数である．Si の場合， $E < 10^3 \text{V/cm}$ で表 10.1 にある定数， $E = 10^3 \sim 10^4$ で $E^{-1/2}$ に比例，それ以上では $1/E$ に比例して変化する．温度に対しては， $100 \sim 400 \text{K}$ で μ はおよそ T^{-m} に比例する． m は物質およびキャリアに依存した定数で，Ge の場合，電子は $m = 1.66$ ，正孔は $m = 2.33$ となっている．

ρ を電荷密度， v を速度とすると，電流密度は $J = \rho v$ なので，真性半導体での電流密度は，

$$J = en_i(\mu_e + \mu_h)E \quad (10.3)$$

となる．更に，導電率 σ を使うと $J = \sigma E$ と書けるから，

$$\sigma = en_i(\mu_e + \mu_h) \quad (10.4)$$

であることがわかる．この逆数が抵抗率 ρ である．

10.1.5 再結合とトラッピング

伝導帯の電子が空いている価電子帯へ光子を放出しながら落ちることを直接再結合という．運動量とエネルギーの保存のため，電子と正孔が適当な値を持つときにしか起きず，この反応だけではキャリアの寿命は 1 秒程となる．しかし実際の寿命のオーダーは $\text{ns} \sim 100 \mu\text{s}$ 程度である．

結晶中の不純物は図 10.3 のように禁止帯に新たなエネルギー準位を作る．この準位には不純物に種類により再結合中心とトラップ中心の二種類がある．前者の場合，伝導帯からこの準位にトラップされた電子は，一定時間後また伝導帯に戻るか，トラップされている間に正孔も捕獲され対消滅する．これを間接再結合といい，直接再結合より高い頻度で起きる．検出器では再結合の頻度が高いと電荷の数え落としの原因となる．後者の場合，この準位に電子，正孔のうち 1 種類しか捕獲できない．トラップされたキャリアは一定時間後開放される．トラップの時間が長ければ，こちらも数え落としの原因となる．

以上のようなことは，点欠陥など格子の構造的欠陥によっても起きる．構造的欠陥の原因として，結晶生成時のもの，熱衝撃，塑性変形，放射線による応力，衝撃があげられる．

10.2 ドーピングした半導体

三価や五価の不純物を加えることで，伝導帯の電子や正孔を増やすことができる．そのような半導体を外因性半導体，この不純物をドーパント，特に三価をアクセプター，五価をドナーと呼ぶ．前節の有害な不純物との違いは，禁止帯にできるエネルギー準位が伝導帯や価電子帯に近く，長い時間トラップされない点である．

図 10.4 の (a) は五価を加えた n 型，(b) は三価を加えた p 型の模式図．n 型は多数キャリアが電子，少数キャリアが正孔で，価電子帯はほぼ埋まっている．価電子帯に入らない過剰な電子は伝導帯のすぐ下 (Ge では 0.01eV 下) の新しく出来た準位に入り，常温で簡単に伝導帯へ励起する．p 型は多数キャリアが正孔，少数キャリアが電子である．価電子帯のすぐ上に新たな準位が出来，そこへ電子が簡単に励起されることで正孔が増え，伝導帯の電子は減る．

Ge の密度 10^{22} atoms/cm³ に対し、ドーパントの典型的な濃度は 10^{13} atoms/cm³ 程度と小さい。ちなみに、 10^{20} atoms/cm³ 程度の高濃度にドーパされた伝導性の半導体は、 p^+ 型、 n^+ 型というように + をつけて表され、電気接点に使われる。

ドーパントの種類に関わらず、電子と正孔の濃度 n, p は質量作用の法則に従い、

$$np = n_i^2 = AT^3 \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \quad (10.5)$$

となる。 n_i は (10.1) 式の濃度だが、ドーパされる前後で np は一定なのでこれが成り立つ。 N_D, N_A をドナー、アクセプターの濃度とすると、半導体は全体で中性なので、

$$N_D + p = N_A + n. \quad (10.6)$$

n 型では $N_A = 0, n \gg p$ なので、

$$n \simeq N_D. \quad (10.7)$$

(10.5) より、少数キャリアの濃度は、

$$p \simeq \frac{n_i^2}{N_D}. \quad (10.8)$$

(10.4) より、n 型の導電率および抵抗率は、

$$\frac{1}{\rho} = \sigma \simeq eN_D\mu_e \quad (10.9)$$

となる。

10.2.1 補償

ドナーとアクセプターの両方がある場合、互いにキャンセルする。これを補償という。よって、 $|N_D - N_A|$ が正味の濃度となり、濃い方の性質が現れる。濃度がほぼ同じときは真性半導体として振る舞う。そういう物質を補償された物質と呼び、i の文字で表される。

補償にはリチウムドリフトを使う。p 型の表面にドナーであるリチウムを拡散させ、逆電圧をかけてドリフトさせることで補償できる。ただし、リチウムは移動度が高いため液体窒素で保存する必要がある (Si は短い時間なら室温でも良い)。

補償された半導体の抵抗率は、Si で $100,000\Omega cm$ と非常に高い。ただし、真性半導体では $230,000\Omega cm$ と更に高く、補償は完璧ではないことが分かる。