第１０回　ドリフト電流と拡散電流

※本日の講義のポイント

半導体中を移動するキャリアの輸送機構には、電界によってキャリアが運ばれるドリフト現象と濃度勾配によってキャリアが移動する拡散現象の二つの機構があることを学ぶ。また、熱平衡状態において成り立つ拡散定数と移動度の関係式である、アインシュタインの関係式について理解する。また、多数キャリアの注入について学ぶ。

<u>半導体中の電気伝導機構</u>

- ドリフト電流（drift current）
- 拡散電流（diffusion current）

・　ドリフト電流：電界が存在することによりキャリアがドリフトする

<u>低電界領域において</u>

n 型：$j_e = qnv = qn\mu_e F$

p 型：$j_h = qpv = qp\mu_h F$

※　電界が大きくなると、格子振動の影響により $v = \mu F$ の関係が成り立たなくなる

(速度飽和)

・　拡散電流：キャリアの濃度勾配によって流れる電流

ドーピングをしていない半導体：$pn = n_i^2$、$p = n$

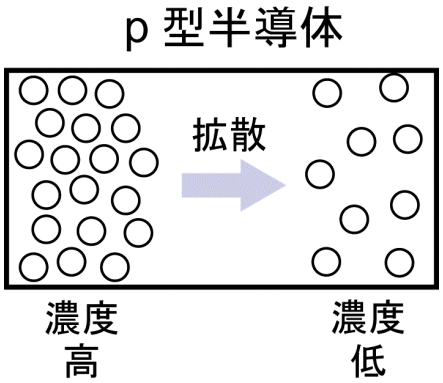
キャリア濃度　$n_i \sim 10^{10}$ cm^{-3}

ドーピングをした半導体

キャリア濃度　$10^{16} \sim 10^{19\sim20}$ cm^{-3}

半導体内部にはキャリアの濃度勾配が発生する

（金属では自由電子の数が非常に多く、濃度勾配は存在しない）



正孔は濃度が高いほうから低いほうに拡散(diffusion)する

電流：単位時間に通過する電荷量　([A] = [C/s])

拡散現象によってキャリアが運ばれる

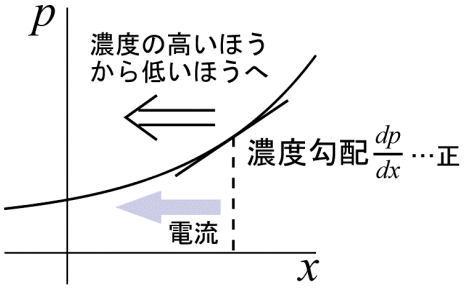
→拡散によって電流が流れる ← 拡散電流

正孔の拡散

（拡散によって動く正孔の数）∝（濃度勾配）

比例係数を D_h と書くと（D_h：拡散定数[cm^2/s]）

$$j_h = -qD_h \frac{dp}{dx}$$

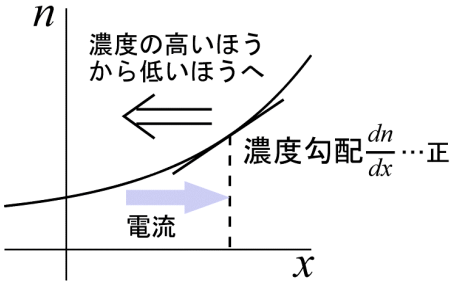


同様に電子の拡散について考えてみる

※ 電子電流の向きは電子の移動する方向と逆向き

電子の拡散定数を D_e とすると

$$j_e = qD_e \frac{dn}{dx}$$



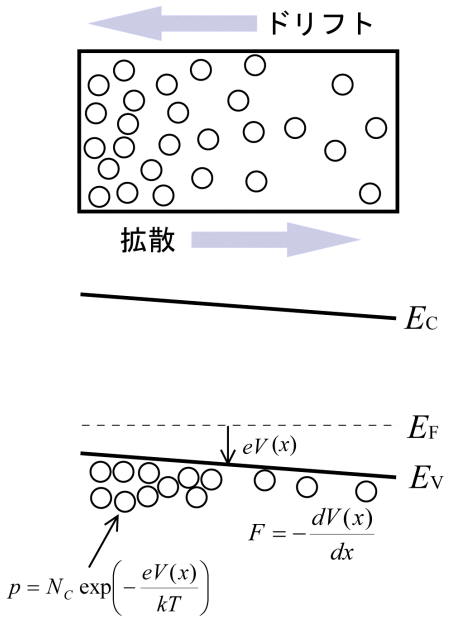
半導体中の電気伝導はドリフト電流と拡散電流の和で表される

電子電流： $j_e = q\left(n\mu_e F + D_e \frac{dn}{dx}\right)$

正孔電流： $j_h = q\left(p\mu_h F - D_h \frac{dp}{dx}\right)$

アインシュタインの関係式（拡散定数と移動度の関係式）

拡散定数：キャリアの動きやすさを表すパラメータ
→移動度と関係あり



正孔について考えてみる

フェルミ準位E_Fを基準にした場合のある位置xにおける電界は

$$F = -\frac{dV(x)}{dx}$$

ある位置xにおけるキャリア密度はマクスウェル－ボルツマン分布（第5回講義資料参照）が成り立つことを仮定すると

$$p = N_V \exp\left(-\frac{qV(x)}{kT}\right)$$

これより

$$\frac{dp}{dx} = \frac{dp}{dV}\frac{dV}{dx} = -\frac{q}{kT}p\frac{dV}{dx} = \frac{qp}{kT}F$$

熱平衡状態においては正味の電流は流れないので

$$j_h = q\left(p\mu_h F - D_h\frac{dp}{dx}\right) = 0$$

以上の結果をまとめると、以下の関係式が導かれる

$$D_h = \frac{kT}{q}\mu_h$$

電子についても同様に考えられ、次の関係式が導かれる

$$D_e = \frac{kT}{q}\mu_e$$

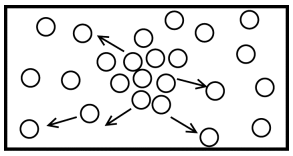
これらの結果に示されるように（無機半導体においては）拡散定数Dと移動度μは比例する
（アインシュタインの関係式）

多数キャリア注入

キャリア注入：熱平衡状態に比べてキャリア濃度を何らかの方法で増やすこと

(熱拡散、イオン注入など)

・多数キャリア(正孔)を注入する場合



p 型半導体中にキャリア注入する

(注入する量は元々の量よりも少ない)

過剰の正孔は極めて短時間に一様に広がろうとする

→ps (10^{-12} s)のオーダー

誘電緩和現象

(補足：ベクトル公式を用いた誘電緩和時間の導出)

過剰キャリア濃度Δp の時間変化は電流密度 $\boldsymbol{i}$ を用いて次のように書ける

$$q\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\mathrm{div}\,\mathbf{i}$$

この電流密度 $\boldsymbol{i}$ は過剰キャリアによって形成されるポテンシャルを V とするとオームの法則より次のように表せる

$$\boldsymbol{i} = -\sigma\,\mathrm{grad}V \quad (1\text{ 次元だと } i = -\sigma\frac{dV}{dx} = \sigma F)$$

さらにポテンシャル V はポアソン方程式より次のように表せる

$$\nabla^2 V = -\frac{q\Delta p}{\varepsilon_r \varepsilon_0}$$

ベクトル公式より $\nabla^2 V = \mathrm{div}\cdot(\mathrm{grad}V)$ であるので、以下の式が成り立つ

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\sigma \Delta p}{\varepsilon_r \varepsilon_0}$$

この式を解くとΔp は時間の関数として次のように表せる

$$\Delta p(t) = \Delta p(0)\exp\left(-\frac{t}{\tau'}\right), \quad \tau' = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{\sigma}$$

ここでτ'は誘電緩和時間と呼ばれるパラメータである。

10^{18} cm^{-3} のキャリア濃度をもつ p 型 Si のτ'を計算してみると、ε_r =11.7、σ=10 S/cm =1000 S/m (テキスト「半導体物性」p145 図 6.18 参照)であるので以下のように計算できる

$$\tau' = \frac{11.7\times 8.854\times 10^{-12}}{1000} = 1.04\times 10^{-13}\,\mathrm{s}$$