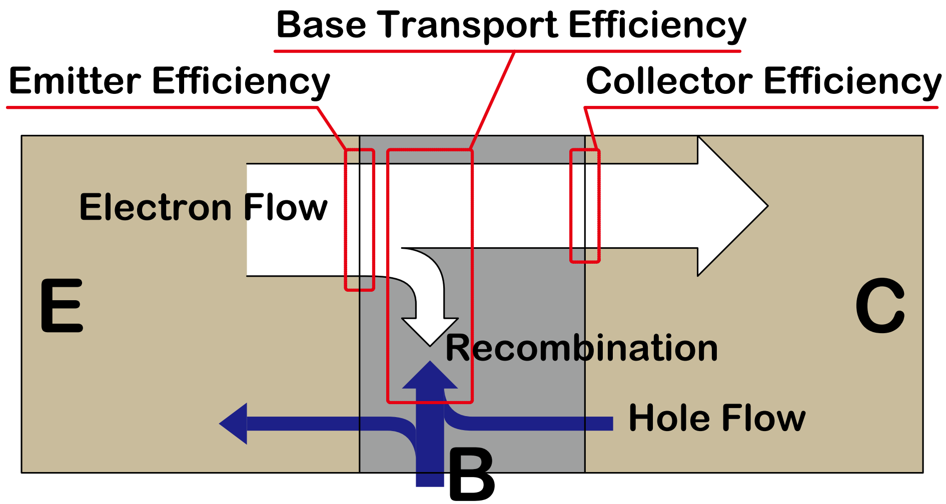
電子デバイス工学

０７
バイポーラトランジスタ
（２）静特性と動特性

トランジスタの性能指標

エミッタ効率　γ_F
ベース輸送効率　α_T

エミッタ効率：　「なるべく正孔電流は流れて欲しくない」の程度
ベース輸送効率：「なるべくベース内で再結合して欲しくない」の程度



こうした指標が，エミッタ，ベース，コレクタを構成する半導体の物性や構造とどのような関係にあるかを数式で明確化する．
➔　どんな素材を使うか，どんな構造にするか，の指針が得られる．

トランジスタの設計指針

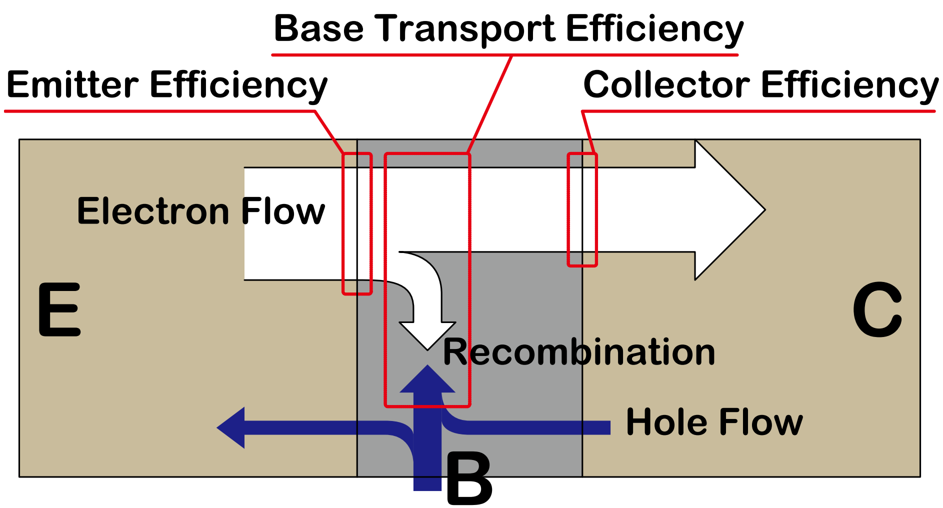
エミッタ効率　γ_F
ベース輸送効率　α_T

エミッタ効率に関係する指針

ベース不純物は少なく（アクセプタを少なく）
エミッタ不純物は多く（ドナーを多く）

ベース輸送効率に関係する指針

ベース厚みはなるべく薄く
ベース中の電子の拡散長がなるべく長くなるように



本日の講義目的：
この結論に至る道筋を
数式を使ってたどる

式がいっぱいなので，
まずは結論から….

数式によるトランジスタ動作解釈のための準備

まずは，pnの接合における小数キャリアの振るまいを理解しておく必要がある.

注入

１．空乏層端からの少数キャリアの注入

バイアスＶが印加されたとき，空乏層から注入される
少数キャリアの密度は，熱平衡の時と比べてどれくらいか？

輸送

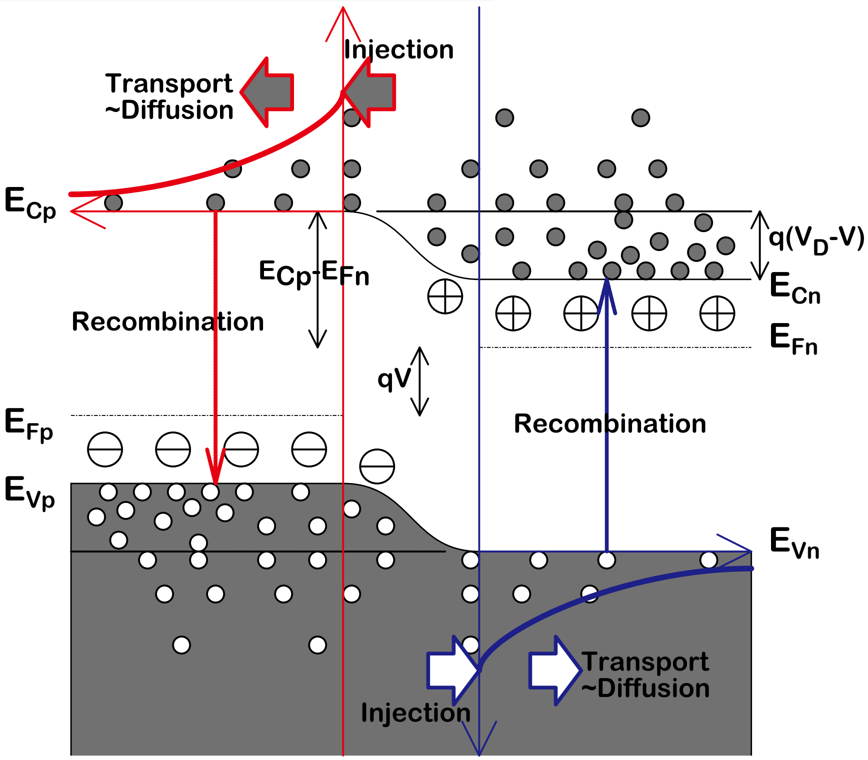
２．半導体中を流れるキャリアの輸送（ドリフト＋拡散）

電界が印加されている空乏層から出たキャリアは,
電界がほとんど無いバルク部分でどのように輸送されるか

消滅

３．半導体中のキャリアの再結合（寿命，拡散長）

輸送されている最中に少数キャリアはどれくらいの
割合で再結合して無くなっていくか？



これら三つが，デバイス動作特性を決めている主要なプロセス

pn接合の数式による復習

少数キャリアの注入

小数キャリアの注入（１／２）

$$n_{\rm p}(0) = n_{\rm n0} \exp\left(-\frac{q(V_{\rm D}-V)}{kT}\right)$$

実効状態密度を用いたn形側の熱平衡状態の電子密度（第０３回参照）

$$n_{\rm n0} = N_{\rm C} \exp\left(-\frac{E_{\rm Cn}-E_{\rm Fn}}{kT}\right)$$

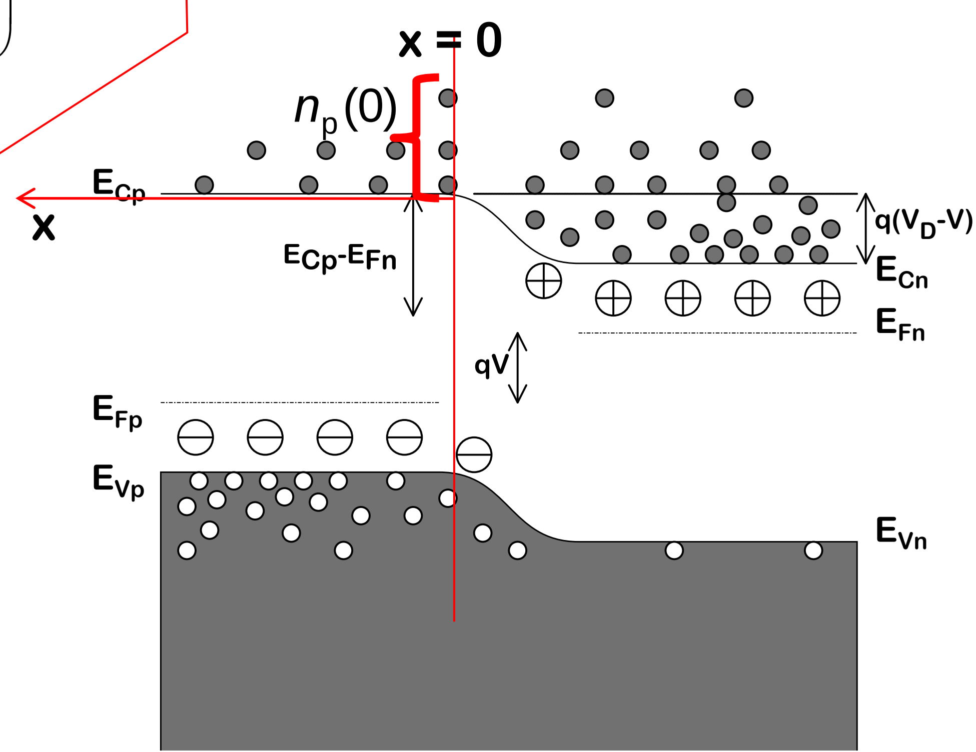
$$n_{\rm p}(0) = N_{\rm C} \exp\left(-\frac{E_{\rm Cn}-E_{\rm Fn}}{kT}\right)\exp\left(-\frac{q(V_{\rm D}-V)}{kT}\right)$$

バンド図からわかるエネルギー準位の関係

$$q(V_{\rm D}-V) = E_{\rm Cp}-E_{\rm Cn}$$

$$qV = E_{\rm Fn}-E_{\rm Fp}$$

$$n_{\rm p}(0) = N_{\rm C} \exp\left(-\frac{E_{\rm Cn}-(qV-E_{\rm Fp})}{kT}\right) \times \exp\left(-\frac{E_{\rm Cp}-E_{\rm Cn}}{kT}\right)$$



小数キャリアの注入（2／2）

$$n_p(0) = N_C \exp\left(-\frac{E_{Cn} - (qV - E_{Fp}) + (E_{Cp} - E_{Cn})}{kT}\right)$$

$$= \boxed{N_C \exp\left(-\frac{E_{Cp} - E_{Fp}}{kT}\right)} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

$$= n_{p0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

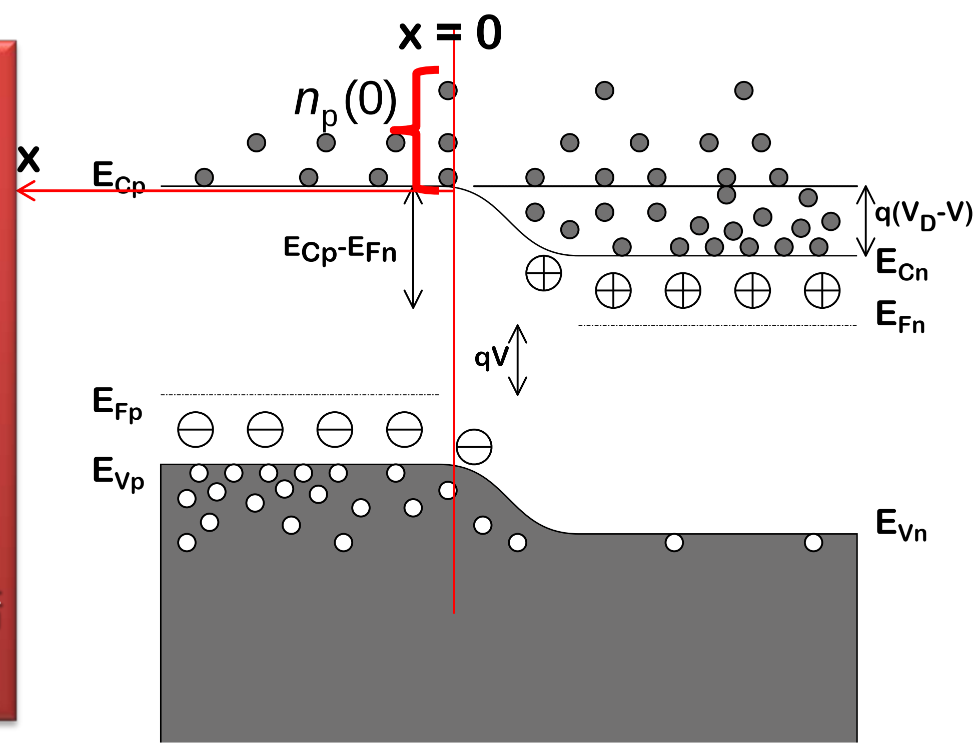
実効状態密度を用いたp形側の熱平衡状態の電子密度（第０３回参照）

$$n_{p0} = N_C \exp\left(-\frac{E_{Cp} - E_{Fp}}{kT}\right)$$

pn接合にVなるバイアス電圧が印加されると，p形側へは，空乏層端から以下の少数キャリアが注入される.

$$n_p(0) = n_{p0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

p形側の熱平衡状態の密度のexp(qV/kT)倍のキャリアが注入される.



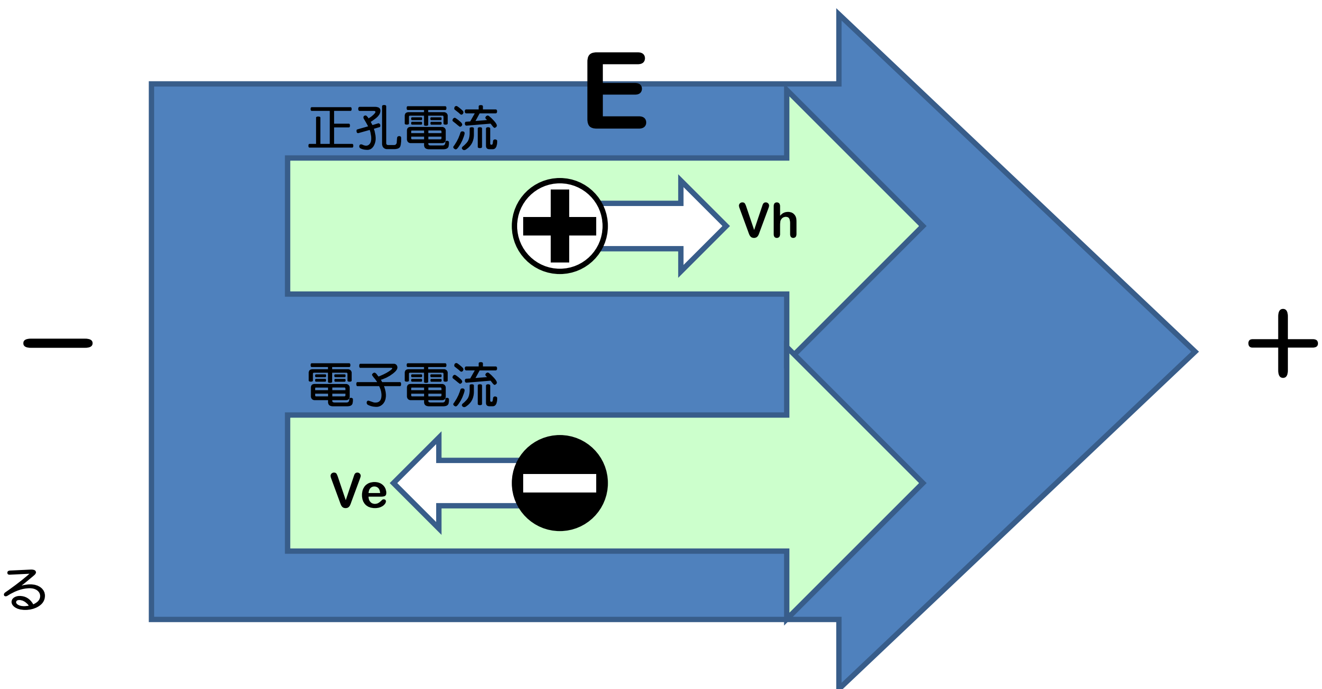
pn接合の数式による復習

少数キャリアの輸送

ドリフト　　移動度 μ

ドリフト：駆動力＝電界

$v_{\mathrm{e}} = -\mu_{\mathrm{e}} E$	速度	$v_{\mathrm{h}} = +\mu_{\mathrm{h}} E$
$\Phi_{\mathrm{e}} = n v_{\mathrm{e}} = -n\mu_{\mathrm{e}} E$	フラックス	$\Phi_{\mathrm{h}} = p v_{\mathrm{h}} = p\mu_{\mathrm{h}} E$
$J_{\mathrm{e}} = -q\Phi_{\mathrm{e}} = qn\mu_{\mathrm{e}} E$	電流	$J_{\mathrm{h}} = q\Phi_{\mathrm{h}} = qp\mu_{\mathrm{h}} E$



フラックス
単位面積あたり
単位時間あたり
に断面を通過する
粒子の個数

拡散　　　拡散係数 D

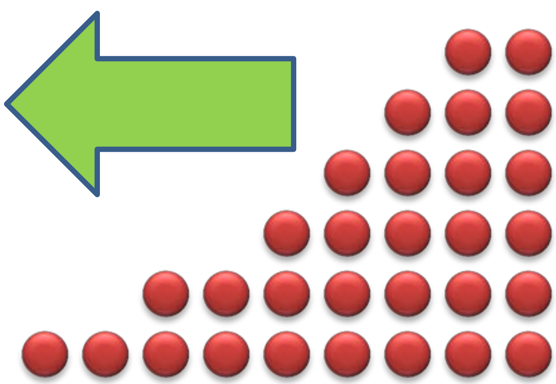
拡散：駆動力＝密度勾配

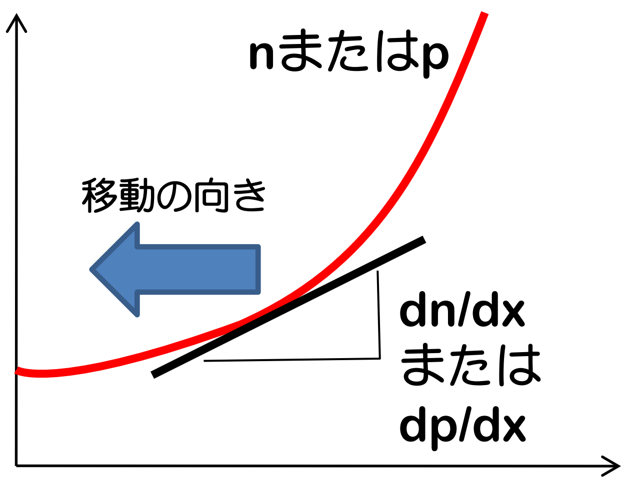
$$\Phi_e = -D_e \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$\Phi_h = -D_h \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$J_e = -q\Phi_e = qD_e \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$J_h = q\Phi_h = -qD_h \frac{\partial p}{\partial x}$$





電流

電流　＝　（電荷量）×（電荷の流れ）

電荷の流れ

ドリフト　拡散　　　ドリフト　拡散

$$\Phi_{\mathrm{e}} = -n\mu_{\mathrm{e}} E - D_{\mathrm{e}} \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$\Phi_{\mathrm{h}} = p\mu_{\mathrm{h}} E - D_{\mathrm{h}} \frac{\partial p}{\partial x}$$

電流　x(-q)　電子の電荷 = -q　　　x(+q)　正孔の電荷 = +q

$$J_{\mathrm{e}} = qn\mu_{\mathrm{e}} E + qD_{\mathrm{e}} \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$J_{\mathrm{h}} = qp\mu_{\mathrm{h}} E - qD_{\mathrm{h}} \frac{\partial p}{\partial x}$$

電界の無いとき

$$\boxed{J_{\mathrm{e}} = qD_{\mathrm{e}} \frac{\partial n}{\partial x}}$$

$$\boxed{J_{\mathrm{h}} = -qD_{\mathrm{h}} \frac{\partial p}{\partial x}}$$

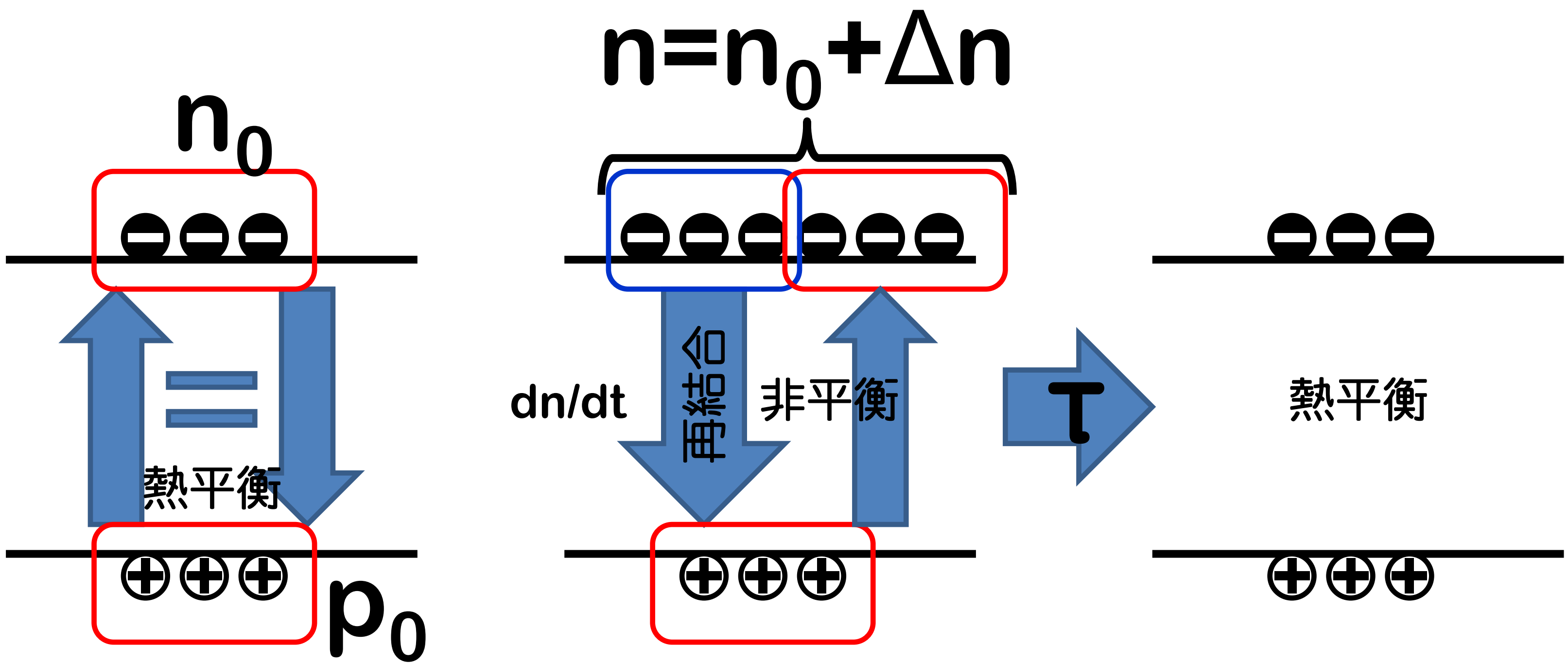
pn接合の数式による復習

少数キャリアの消滅

再結合　　　寿命 τ

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n - n_0}{\tau_e} \qquad \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p - p_0}{\tau_h}$$

n0, p0　熱平衡状態の電子・正孔の密度
n, p　　注入などで熱平衡からずれたときの電子・正孔の密度



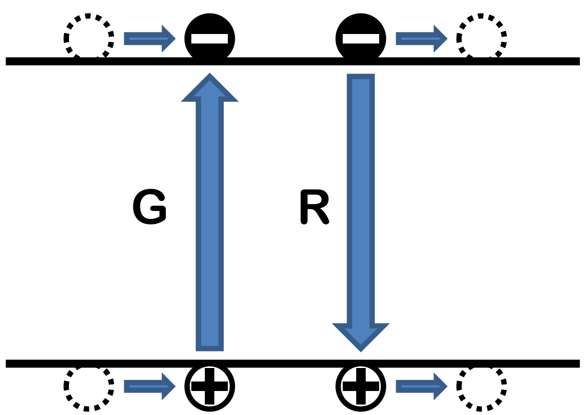
再結合（詳細説明１／３）

生成と再結合による物質の密度変化の基本式は,

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - R = G - \gamma\, pn$$

$n = n_0 + \Delta n$　　　$p = p_0 + \Delta p$　　と書くことにすると,

$$\begin{aligned}\frac{\partial n}{\partial t} &= G - \gamma\,(p_0 + \Delta p)(n_0 + \Delta n)\\ &= G - \gamma(p_0 n_0 + p_0 \Delta n + n_0 \Delta p + \Delta p \Delta n)\end{aligned}$$



生成(G: Generation)　　駆動力＝外部からの励起（温度や光）

G=const.

再結合(R: Recombination)　駆動力＝再結合相手の密度

R∝pn

再結合（詳細説明２／３）

熱平衡からのずれがあまり大きくない p 形半導体中の小数キャリアの場合

「p 形半導体中」ということ　➔　$n_0 << p_0$
「熱平衡からずれてない」ということ　➔　Δp，$\Delta n << n_0, p_0$

$$p_0 n_0 + p_0 \Delta n + \cancel{n_0 \Delta p} + \cancel{\Delta p \Delta n} \approx p_0 n_0 + p_0 \Delta n$$

よって，

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \boxed{G - \gamma\, p_0 n_0} - \gamma\, p_0 \Delta n$$

熱平衡状態のn_0, p_0に関しては，　$\frac{\partial n_0}{\partial t} = G - R = \boxed{G - \gamma\, p_0 n_0 = 0}$　であるから，

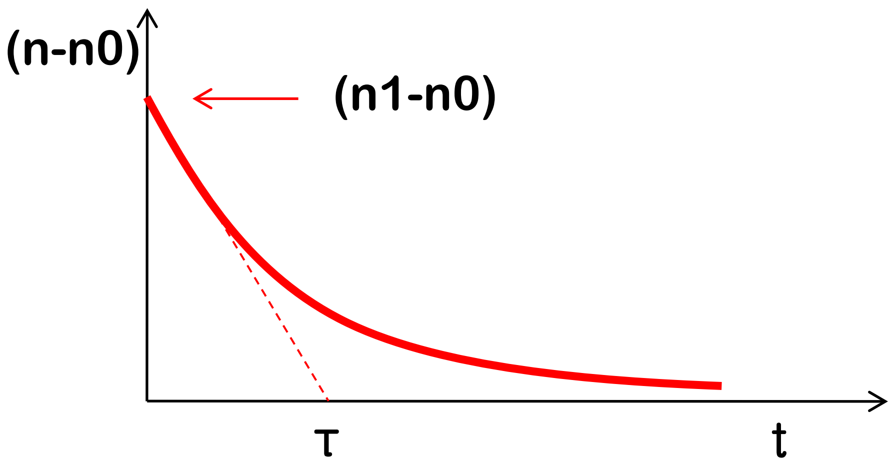
$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\gamma\, p_0 \Delta n = -\frac{\Delta n}{\tau_e} = -\frac{n - n_0}{\tau_e}$$

$$\tau_e \equiv \frac{1}{\gamma\, p_0}$$

再結合（詳細説明３／３）

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n - n_0}{\tau_e}$$

$$(n - n_0) = (n_1 - n_0)\exp\left(-\frac{t}{\tau_e}\right)$$



pn接合の数式による復習

少数キャリア連続の式

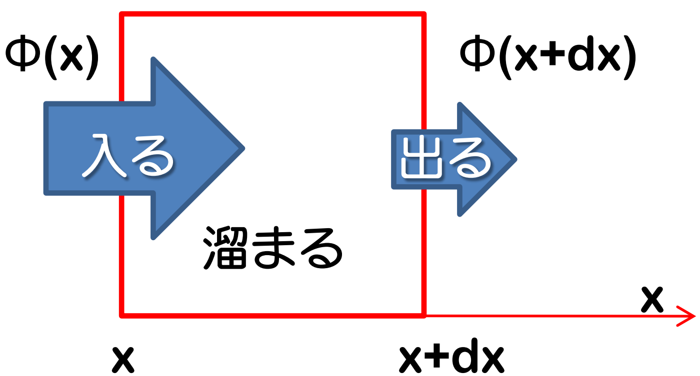
少数キャリアの空乏層の外での密度分布
少数キャリアの空乏層の外での電流

少数キャリア連続の式（1／2）

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n - n_0}{\tau_{\mathrm{e}}} - \frac{\partial \Phi_{\mathrm{e}}}{\partial x} \qquad \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p - p_0}{\tau_{\mathrm{h}}} - \frac{\partial \Phi_h}{\partial x}$$

（単位時間当たりの増量）＝
（単位時間当たりに流れ込んだ数）－（単位時間当たりに流れ出た数）

dn/dt = - { Φ(x+dx) – Φ(x) } / dx = - dΦ/dx



マイナス符号を忘れずに

dn/dtが正（増える）場合は,
Φ(x+dx) < Φ(x) のハズですよね.

少数キャリア連続の式（2／2）

フラックス表示

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n-n_0}{\tau_{\mathrm{e}}} - \frac{\partial \Phi_{\mathrm{e}}}{\partial x} \qquad \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p-p_0}{\tau_{\mathrm{h}}} - \frac{\partial \Phi_{\mathrm{h}}}{\partial x}$$

電流密度表示（＋－の符号の変化に注意）

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n-n_0}{\tau_{\mathrm{e}}} + \frac{1}{q}\frac{\partial J_{\mathrm{e}}}{\partial x} \qquad \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p-p_0}{p_{\mathrm{h}}} - \frac{1}{q}\frac{\partial J_{\mathrm{h}}}{\partial x}$$

全部書き下すと，

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n-n_0}{\tau_{\mathrm{e}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(n\mu_{\mathrm{e}} E + D_{\mathrm{e}}\frac{\partial n}{\partial x}\right)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p-p_0}{\tau_{\mathrm{h}}} - \frac{\partial}{\partial x}\left(p\mu_{\mathrm{h}} E - D_{\mathrm{h}}\frac{\partial p}{\partial x}\right)$$

pn接合の空乏層の外における少数キャリア連続の式（1／2）

$$\frac{\partial n_\mathrm{p}}{\partial t} = -\frac{n_\mathrm{p} - n_\mathrm{p0}}{\tau_\mathrm{e}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(n_\mathrm{p}\mu_\mathrm{e} E + D_\mathrm{e} \frac{\partial n_\mathrm{p}}{\partial x} \right)$$

空乏層外では電界がゼロ（**E=0**）．定常状態では密度変化無し（**dn/dt = 0**）．よって，

$$\boxed{D_\mathrm{e} \frac{\partial^2 n_\mathrm{p}}{\partial x^2} - \frac{n_\mathrm{p} - n_\mathrm{p0}}{\tau_\mathrm{e}} = 0}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} n_\mathrm{p} - \frac{1}{\tau_\mathrm{e} D_\mathrm{e}} n_\mathrm{p} + \frac{n_\mathrm{p0}}{\tau_\mathrm{e} D_\mathrm{e}} = 0$$

二階線形微分方程式

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} n_\mathrm{p} - \frac{1}{L_\mathrm{e}^2} n_\mathrm{p} + \frac{n_\mathrm{p0}}{L_\mathrm{e}^2} = 0$$

$$\sqrt{\tau_\mathrm{e} D_\mathrm{e}} = L_\mathrm{e}$$

拡散長

要するにこれを解けば，キャリアの密度分布が出る

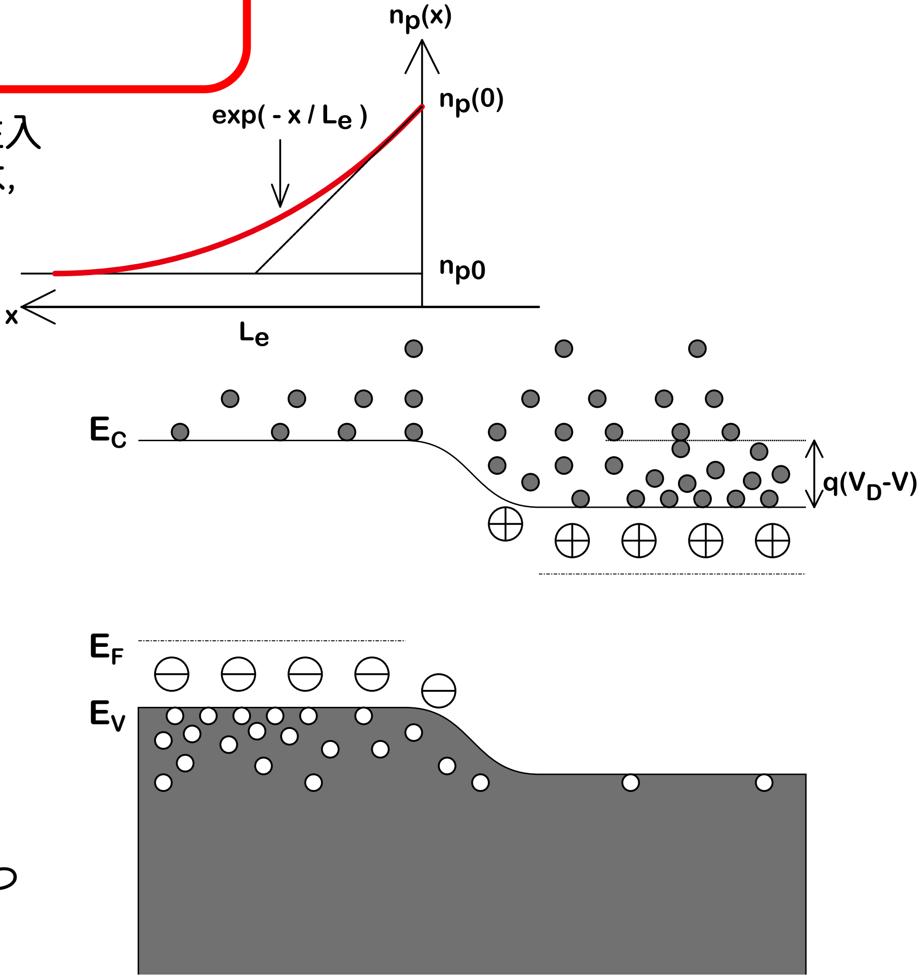
pn接合の数式による復習

少数キャリアの密度分布

p形半導体中の少数キャリア（電子）の密度分布（1／2）

$$n_{\mathrm{p}} = A\exp\left(\frac{x}{L_{\mathrm{e}}}\right) + B\exp\left(-\frac{x}{L_{\mathrm{e}}}\right) + n_{\mathrm{p0}}$$

先ほどの二階線形微分方程式の解



x = ∞ にて**n_p = n_{p0}** であるから（別の言い方：**p**形側で注入の影響のない遠方では，少数キャリア（電子）の密度は，熱平衡状態のそれ（**n_{p0}**）になるから）

$$A = 0$$

よって，

$$n_{\mathrm{p}} = B\exp\left(-\frac{x}{L_{\mathrm{e}}}\right) + n_{\mathrm{p0}}$$

解釈
注入口から遠くなるに従って指数関数的に減少する．
注入された密度の**1/e**（＋**n_{p0}**があるので「おおよそ」）になる距離が**Le**.
十分遠方では，熱平衡状態の少数キャリア密度**n_{p0}**になっている

p形半導体中の少数キャリア（電子）の密度分布（2／2）

x = 0 にて注入される電子の密度は，　（少数キャリアの注入の項参照）

$$n_\mathrm{p}(0) = n_\mathrm{p0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad ※$$

$$n_\mathrm{p}(0) = B + n_\mathrm{p0} \quad \Rightarrow \quad B = n_\mathrm{p}(0) - n_\mathrm{p0} = n_\mathrm{p0}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right)$$

よって，

$$\boxed{n_\mathrm{p} = n_\mathrm{p0}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right)\exp\left(-\frac{x}{L_\mathrm{e}}\right) + n_\mathrm{p0}}$$

p形の中の電子の場合

n形の中の正孔の場合も同様

※ $n_\mathrm{p}(0) = n_\mathrm{n0} \exp\left(-\frac{q(V_\mathrm{D} - V)}{kT}\right)$ と書くこともできるが，この場合，ｎ形半導体の情報（n_{n0}）が別途必要となってしまうので，全てｐ形半導体の情報だけで完結させるために上記の$n_p(0)$の標記を採用した．

p形半導体中の電子密度分布
n形半導体中の正孔密度分布

$$n_{\mathrm{p}} = n_{\mathrm{p0}}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)\exp\left(-\frac{x}{L_{\mathrm{e}}}\right)+n_{\mathrm{p0}} \qquad p_{\mathrm{n}} = p_{\mathrm{n0}}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)\exp\left(-\frac{x}{L_{\mathrm{h}}}\right)+p_{\mathrm{n0}}$$

順バイアス

$$\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)\approx \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

$$n_{\mathrm{p}} = n_{\mathrm{p0}}\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)\exp\left(-\frac{x}{L_{\mathrm{e}}}\right)+n_{\mathrm{p0}}$$

$$p_{\mathrm{n}} = p_{\mathrm{n0}}\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)\exp\left(-\frac{x}{L_{\mathrm{h}}}\right)+p_{\mathrm{n0}}$$

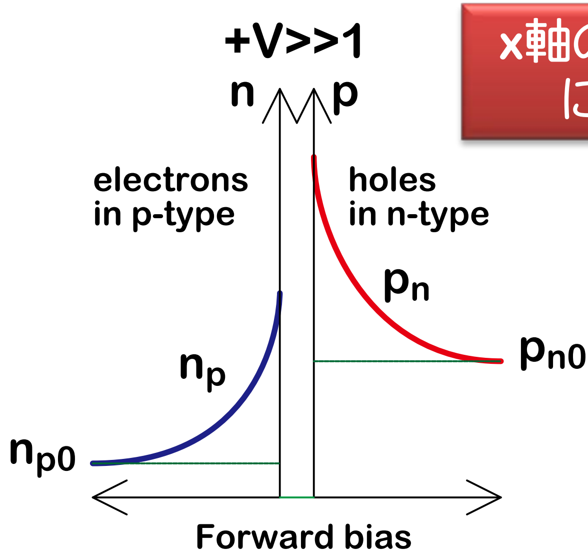
逆バイアス

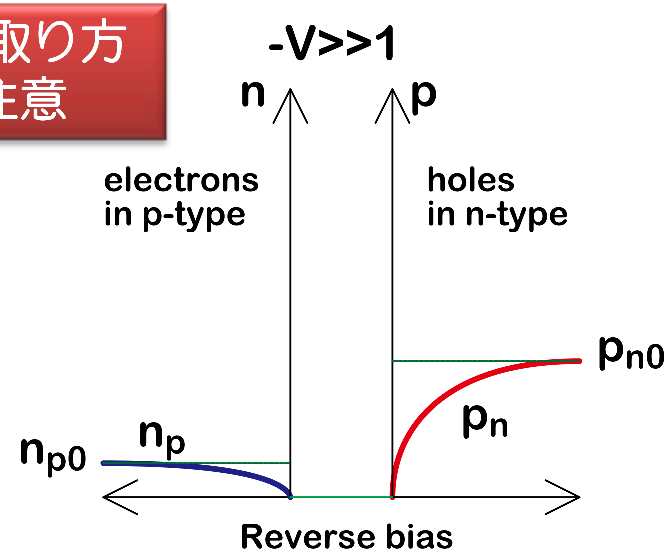
$$\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)\approx -1$$

$$n_{\mathrm{p}} = n_{\mathrm{p0}}\left(1-\exp\left(-\frac{x}{L_{\mathrm{e}}}\right)\right)$$

$$p_{\mathrm{n}} = p_{\mathrm{n0}}\left(1-\exp\left(-\frac{x}{L_{\mathrm{h}}}\right)\right)$$

x軸の取り方
に注意





pn接合の数式による復習

少数キャリアによる電流分布

p形半導体中の少数キャリア（電子）による電流

電流を表す式

$$J_e = qD_e \frac{\partial n}{\partial x}$$

空乏層外なのでE=0

電界(E)が無いので，
拡散電流のみ

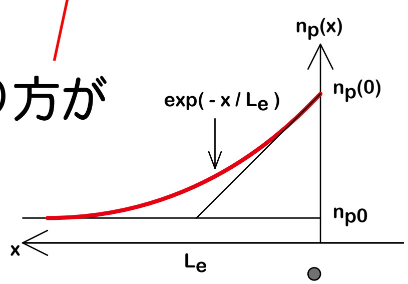
$$J_e = \cancel{qn\mu_e E} + qD_e \frac{\partial n}{\partial x}$$

少数キャリアの
密度分布

$$n_p = n_{p0}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)\exp\left(-\frac{x}{L_e}\right)+n_{p0}$$

$$J_e = -\frac{qD_e n_{p0}}{L_e}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)\exp\left(-\frac{x}{L_e}\right)$$

x 軸の取り方が



となっている.

左向きが正だから，負号
は右向きを意味する

p形半導体中の多数キャリア（正孔）による電流

p形半導体中の電子電流 $$J_{\mathrm{e}} = -\frac{qD_{\mathrm{e}}n_{\mathrm{p0}}}{L_{\mathrm{e}}}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)\exp\left(-\frac{x}{L_{\mathrm{e}}}\right)$$

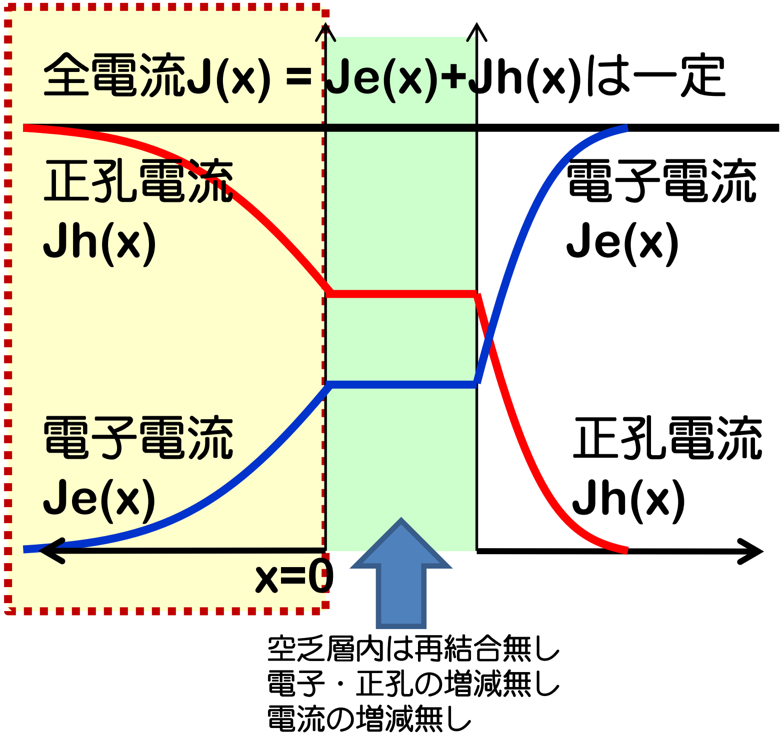
上記の電子電流の担い手である電子が再結合すると，それを補うための正孔が補給される➔正孔の流れとなる➔正孔電流

「電流連続」の法則により，半導体中のどの断面をとっても，全電流は同じ．

「x=0」のときのJ=Je+Jhと同じ電流が「x=任意」において流れる．

JからJeを引いてやれば，正孔電流となる．

n形半導体中では，少数キャリアが正孔，多数キャリアが電子になる以外は，同様．



空乏層を通過する電子電流と正孔電流

電子電流（p→n（右向き）の電流を正とする）

空乏層の左端（p形側）：電子が注入されている

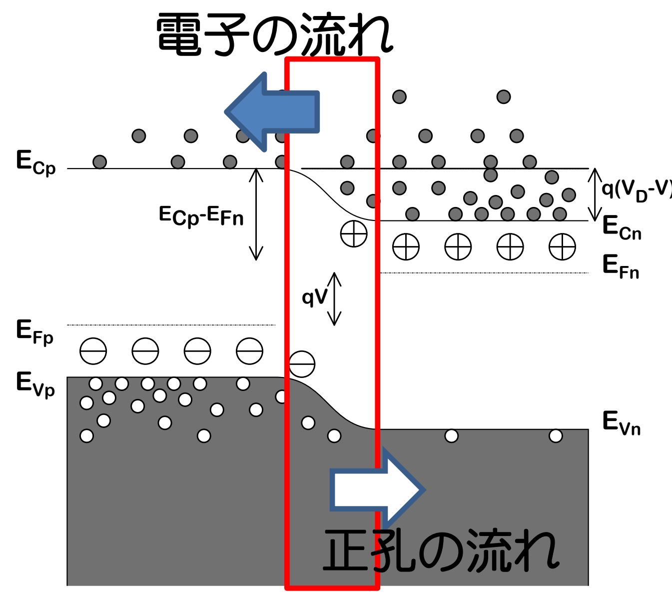
$$J_e(x) = \frac{qD_e n_{p0}}{L_e}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)\exp\left(-\frac{x}{L_e}\right)$$

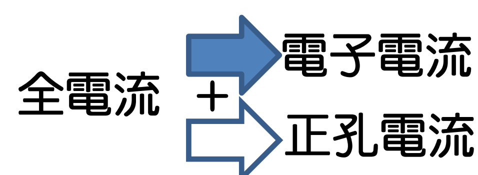
$$J_e(0) = \frac{qD_e n_{p0}}{L_e}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)$$

空乏層の右端（n形側）：正孔が注入されている

（電子の場合と全く同じ論理なので，導出は省略）

$$J_h(0) = \frac{qD_h p_{n0}}{L_h}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)$$





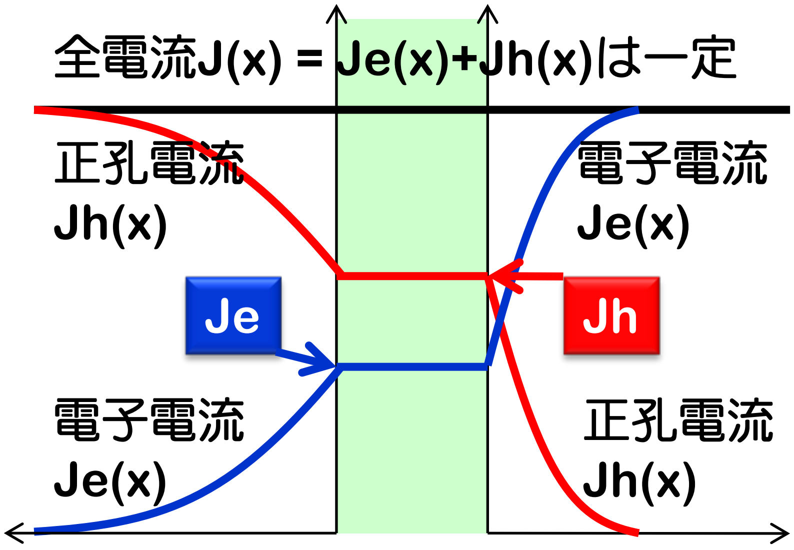
空乏層を通過する全電流

$$J_{\mathrm{e}} = \frac{qD_{\mathrm{e}}n_{\mathrm{p0}}}{L_{\mathrm{e}}}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right) \qquad J_{\mathrm{h}} = \frac{qD_{\mathrm{h}}p_{\mathrm{n0}}}{L_{\mathrm{h}}}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)$$

$$J = J_{\mathrm{e}} + J_{\mathrm{h}} = \left(\frac{qD_{\mathrm{e}}n_{\mathrm{p0}}}{L_{\mathrm{e}}} + \frac{qD_{\mathrm{h}}p_{\mathrm{n0}}}{L_{\mathrm{h}}}\right)\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)$$

$$J_0 = \frac{qD_{\mathrm{e}}n_{\mathrm{p0}}}{L_{\mathrm{e}}} + \frac{qD_{\mathrm{h}}p_{\mathrm{n0}}}{L_{\mathrm{h}}}$$

$$\boxed{J = J_0\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)}$$



順方向バイアスのときの電子電流と正孔電流

$$J_e = \frac{qD_e n_{p0}}{L_e}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)\exp\left(-\frac{x}{L_e}\right) \qquad J_h = \frac{qD_h p_{n0}}{L_h}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)\exp\left(-\frac{x}{L_h}\right)$$

順バイアス

$$\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right) \approx \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

p形半導体中

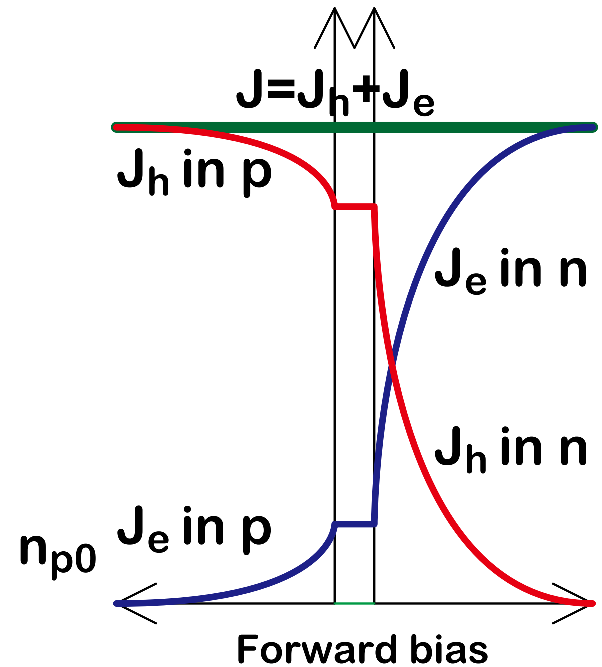
$$J_e = \frac{qD_e n_{p0}}{L_e}\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)\exp\left(-\frac{x}{L_e}\right)$$

$$J_h = J - J_e$$

n形半導体中

$$J_h = \frac{qD_h p_{n0}}{L_h}\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)\exp\left(-\frac{x}{L_h}\right)$$

$$J_e = J - J_h$$



x軸の向きに注意！

電流の向きは，どちらも右向きを正とする

逆方向バイアスのときの電子電流と正孔電流

$$J_e = \frac{qD_e n_{p0}}{L_e}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)\exp\left(-\frac{x}{L_e}\right) \qquad J_h = \frac{qD_h p_{n0}}{L_h}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)\exp\left(-\frac{x}{L_h}\right)$$

逆バイアス

$$\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right) \approx -1$$

p形半導体中

$$J_e = -\frac{qD_e n_{p0}}{L_e}\exp\left(-\frac{x}{L_e}\right)$$

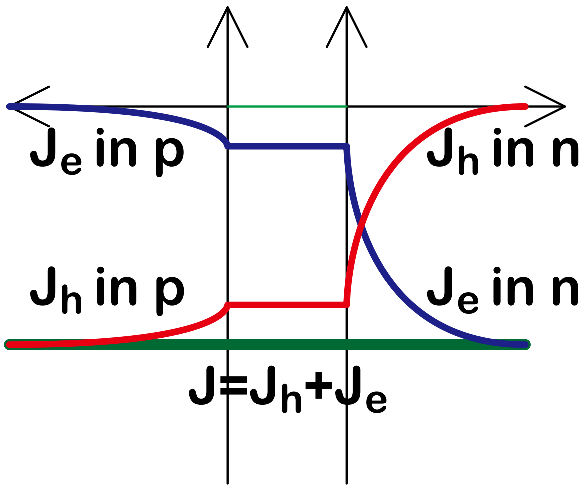
$$J_h = J - J_e$$

n形半導体中

$$J_h = -\frac{qD_h p_{n0}}{L_h}\exp\left(-\frac{x}{L_h}\right)$$

$$J_e = J - J_h$$

右向きを正
として「負」
だから,
このときは
電流は
左向きに
流れる



Reverse bias

x軸の向きに注意！

電流の向きは，どちらも右向きを正とする

J0を不純物濃度で表す

$$J_0 = \frac{qD_e \boxed{n_{p0}}}{L_e} + \frac{qD_h \boxed{p_{n0}}}{L_h}$$

$\boxed{n_{p0}}$ 熱平衡状態時のp形中の電子の密度

= n形中でE_CよりもV_Dだけ上にいる電子の密度 ➡ $n_{p0} = n_{n0} \exp\left(-\frac{qV_D}{kT}\right)$

$\boxed{p_{n0}}$ 熱平衡状態時のn形中の正孔の密度

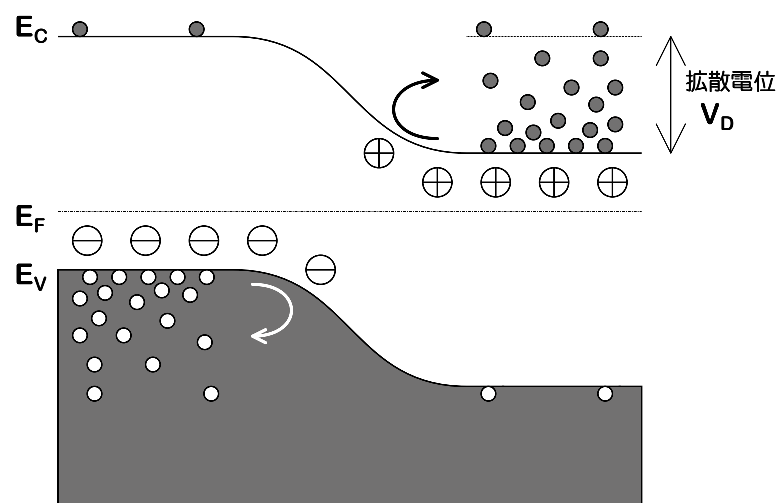
= p形中でE_VよりもV_Dだけ下にいる正孔の密度 ➡ $p_{n0} = p_{p0} \exp\left(-\frac{qV_D}{kT}\right)$

$$J_0 = \left(\frac{qD_e n_{n0}}{L_e} + \frac{qD_h p_{p0}}{L_h}\right)\exp\left(-\frac{qV_D}{kT}\right)$$

$n_{n0} \approx N_D$ $p_{p0} \approx N_A$ であるから,

普通の温度であれば，多数キャリア密度は不純物密度に等しい

$$J_0 = \left(\frac{qD_e N_D}{L_e} + \frac{qD_h N_A}{L_h}\right)\exp\left(-\frac{qV_D}{kT}\right)$$



npn接合トランジスタの数式による解析

ベースの中性領域の少数キャリア密度分布を求める

ベースの中性領域（空乏層外）の少数キャリア（電子）が従う方程式は，

$$D_{\mathrm{eB}}\frac{\partial^2 n_{\mathrm{B}}}{\partial x^2}-\frac{n_{\mathrm{B}}-n_{0B}}{\tau_{\mathrm{eB}}}=0$$

この一般解は，**pn**接合の場合と全く同じであり，

$$n_{\mathrm{B}}(x)=A\exp\left(\frac{x}{L_{\mathrm{eB}}}\right)+B\exp\left(-\frac{x}{L_{\mathrm{eB}}}\right)+n_{0\mathrm{B}} \qquad \sqrt{\tau_{\mathrm{eB}}D_{\mathrm{eB}}}=L_{\mathrm{eB}}$$

$n_B(0)$と$n_B(W)$が境界条件として与えられれば，

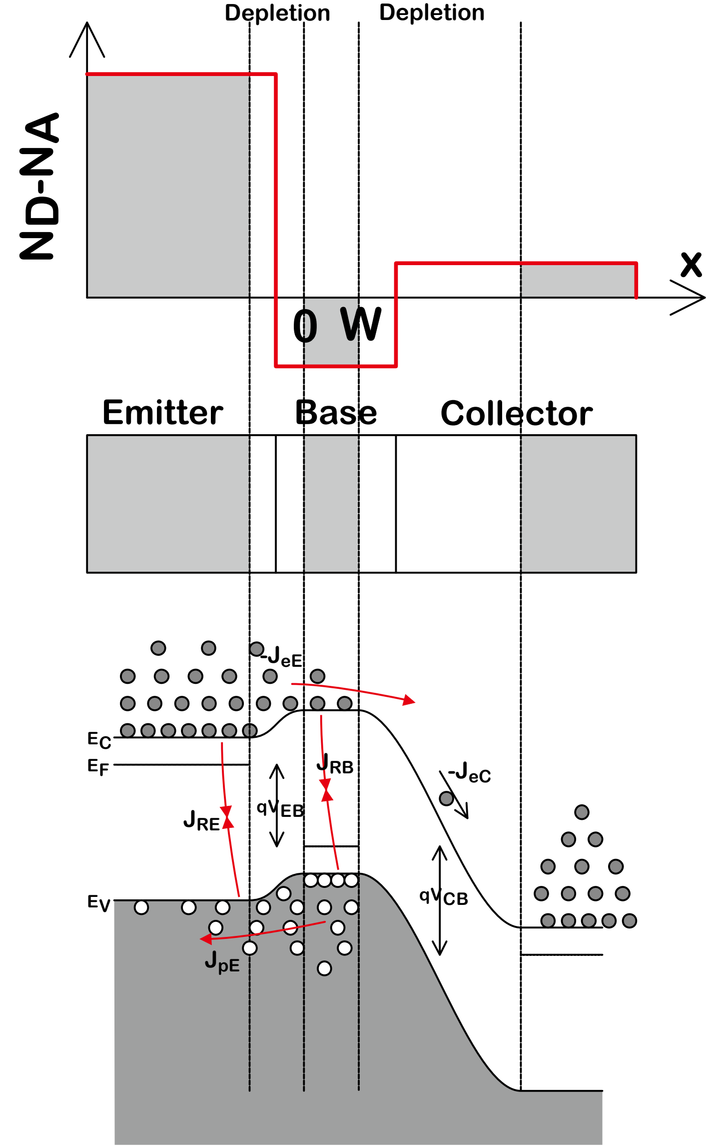
$$n_{\mathrm{B}}(0)=A+B+n_{0\mathrm{B}} \qquad n_{\mathrm{B}}(W)=A\exp\left(\frac{W}{L_{\mathrm{eB}}}\right)+B\exp\left(-\frac{W}{L_{\mathrm{e}}B}\right)+n_{0\mathrm{B}}$$

の関係から，**A, B**を**$n_B(0)$**と**$n_B(W)$**を用いて表すことができる.

$$A=\left\{\left[n_{\mathrm{B}}(W)-n_{0\mathrm{B}}\right]-\left(n_{\mathrm{B}}(0)-n_{0\mathrm{B}}\right)\exp\left(-\frac{W}{L_{\mathrm{eB}}}\right)\right\}\Big/2\sinh\left(\frac{W}{L_{\mathrm{eB}}}\right)$$

$$B=\left\{\left(n_{\mathrm{B}}(0)-n_{0\mathrm{B}}\right)\exp\left(\frac{W}{L_{\mathrm{eB}}}\right)-\left[n_{\mathrm{B}}(W)-n_{0\mathrm{B}}\right]\right\}\Big/2\sinh\left(\frac{W}{L_{\mathrm{eB}}}\right)$$

ただし，$\sinh(x)=\dfrac{e^{x}-e^{-x}}{2}$



境界条件　$n_p(0)$と$n_p(W)$

ＥＢ間のnp接合空乏層端，ＢＣ間のpn接合空乏層端の少数キャリア密度は，
ＥＢ，ＢＣに印加された電圧を用いて以下のように書ける．

$$n_{\mathrm{B}}(0) = n_{0\mathrm{B}} \exp\left(\frac{qV_{\mathrm{BE}}}{kT}\right) \qquad n_{\mathrm{B}}(W) = n_{0\mathrm{B}} \exp\left(\frac{qV_{\mathrm{BC}}}{kT}\right)$$

小数キャリアの注入（２／２）

$$n_p(0) = N_C \exp\left(-\frac{E_{Cn} - (qV - E_{Fp}) + (E_{Cp} - E_{Cn})}{kT}\right)$$
$$= \boxed{N_C \exp\left(-\frac{E_{Cp} - E_{Fp}}{kT}\right)} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$
$$= n_{p0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

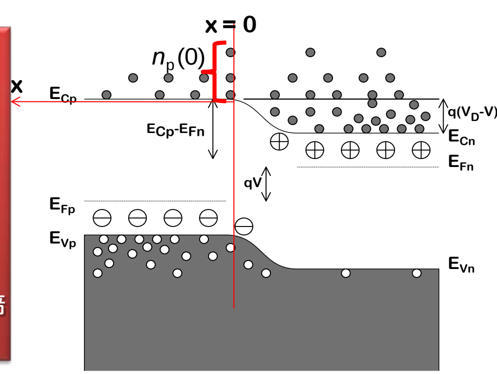
実効状態密度を用いたp形側の熱平衡状態の電子密度（第０３回参照）

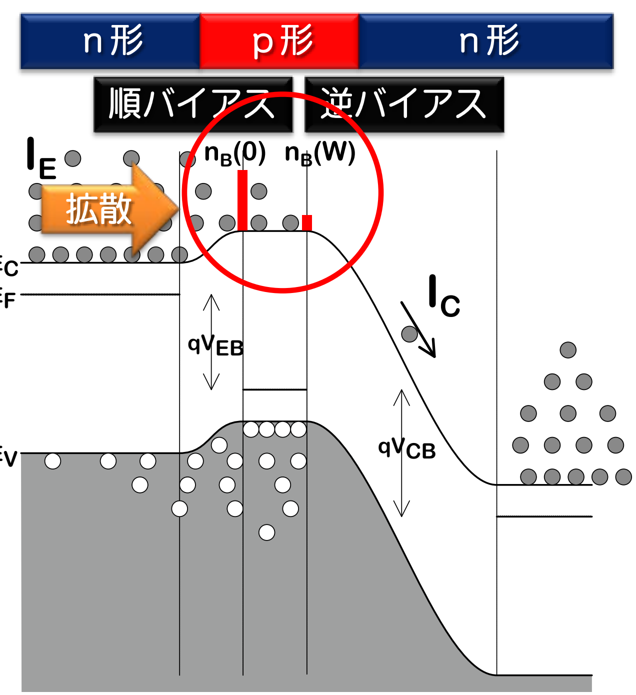
$$n_{p0} = N_C \exp\left(-\frac{E_{Cp} - E_{Fp}}{kT}\right)$$

pn接合にVなるバイアス電圧が印加されると，p形側へは，空乏層端から以下の少数キャリアが注入される．

$$n_p(0) = n_{p0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

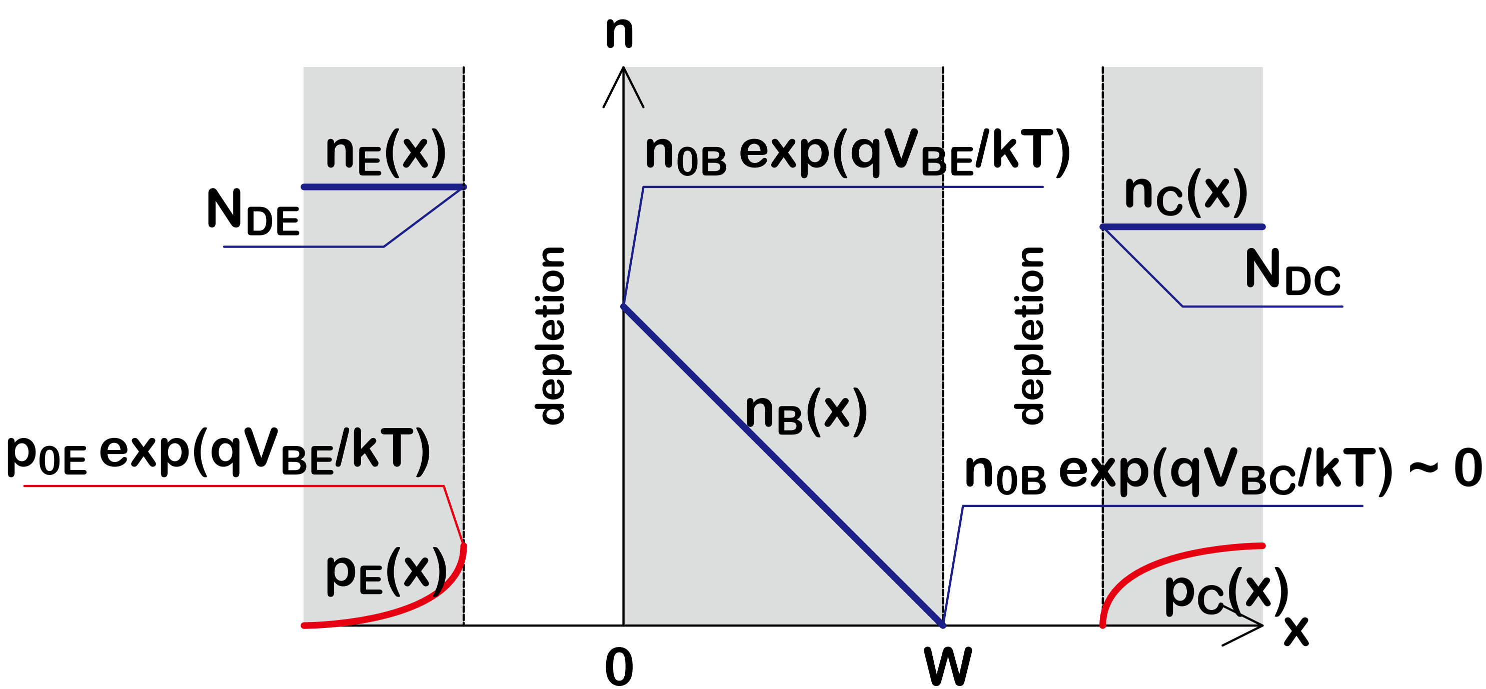
p形側の熱平衡状態の密度のexp(qV/kT)倍のキャリアが注入される．





ベースの中性領域の少数キャリア密度分布の式

$$n_{\mathrm{B}}(x) = n_{0\mathrm{B}}\left\{1+\left[\exp\left(\frac{qV_{\mathrm{BE}}}{kT}\right)-1\right]\frac{\sinh\left(\dfrac{W-x}{L_{\mathrm{eB}}}\right)}{\sinh\left(\dfrac{W}{L_{\mathrm{eB}}}\right)}+\left[\exp\left(\frac{qV_{\mathrm{BC}}}{kT}\right)-1\right]\frac{\sinh\left(\dfrac{x}{L_{\mathrm{eB}}}\right)}{\sinh\left(\dfrac{W}{L_{\mathrm{eB}}}\right)}\right\}$$



ベースの中性領域の少数キャリアによる電流

$$J_{\mathrm{eE}} = qD_{\mathrm{eB}} \left.\frac{\partial n_{\mathrm{B}}}{\partial x}\right|_{x=0}$$

$$= -\frac{qD_{\mathrm{eB}} n_{0\mathrm{B}}}{L_{\mathrm{eB}} \sinh\left(\dfrac{W}{L_{\mathrm{eB}}}\right)} \left\{ \left[\exp\left(\frac{qV_{\mathrm{BE}}}{kT}\right) - 1 \right] \cosh\left(\frac{W}{L_{\mathrm{eB}}}\right) - \left[\exp\left(\frac{qV_{\mathrm{BC}}}{kT}\right) - 1 \right] \right\}$$

$$J_{\mathrm{eC}} = qD_{\mathrm{eB}} \left.\frac{\partial n_{\mathrm{B}}}{\partial x}\right|_{x=W}$$

$$= -\frac{qD_{\mathrm{eB}} n_{0\mathrm{B}}}{L_{\mathrm{eB}} \sinh\left(\dfrac{W}{L_{\mathrm{eB}}}\right)} \left\{ \left[\exp\left(\frac{qV_{\mathrm{BE}}}{kT}\right) - 1 \right] - \cosh\left(\frac{W}{L_{\mathrm{eB}}}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_{\mathrm{BC}}}{kT}\right) - 1 \right] \right\}$$

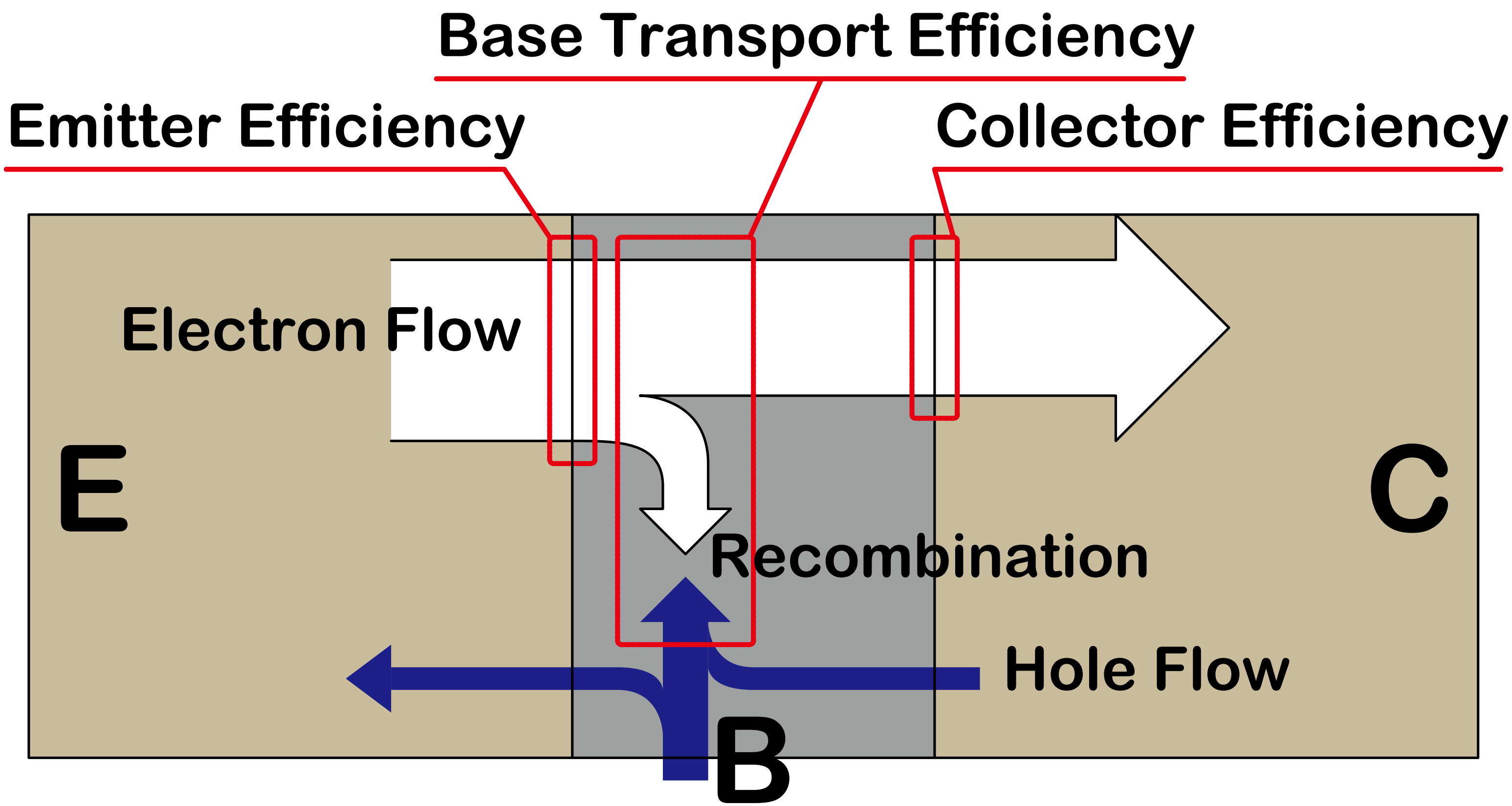
トランジスタの効率

エミッタ効率　γ_F

ベース輸送効率　α_T

エミッタ効率 γ_F
ベース輸送効率 α_T

エミッタ効率：　「なるべく正孔電流は流れて欲しくない」の程度
ベース輸送効率：「なるべくベース内で再結合して欲しくない」の程度



エミッタ効率

理想的なトランジスタ
ベース電流はほとんど流れない　（IB << IE & IC）

必要事項：　ベースからエミッタに注入される正孔電流が小さいこと

その程度を表す指標：

$$\text{エミッタ効率}\quad \gamma_F = \frac{\text{エミッタからベースに注入される電子電流}}{\text{エミッタからベースに注入される全電流}}$$

エミッタ効率が１に近い：　全電流＝電子電流（正孔電流ほとんど無し）

その程度を表す式：

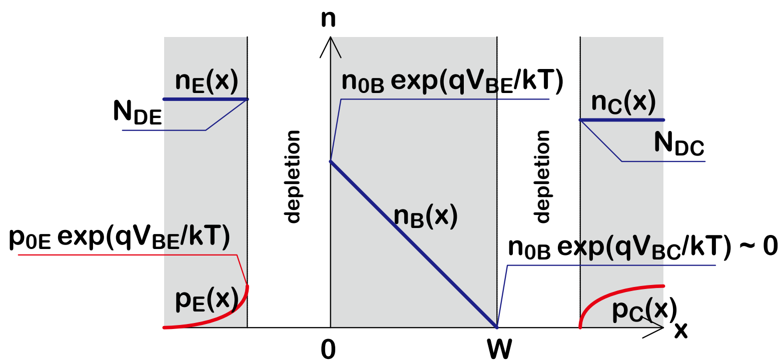
$$\gamma_F = \left.\frac{I_{eE}}{I_{eE} + I_{hE}}\right|_{V_{BC}=0} = \left.\frac{1}{1 + \dfrac{I_{hE}}{I_{eE}}}\right|_{V_{BC}=0}$$

エミッタ効率を表す式

$$J_{\mathrm{eE}} = -\frac{qD_{\mathrm{eB}}n_{\mathrm{p0B}}}{L_{\mathrm{eB}}\sinh\left(\dfrac{W_{\mathrm{B}}}{L_{\mathrm{eB}}}\right)}\left\{\left[\exp\left(\frac{qV_{\mathrm{BE}}}{kT}\right)-1\right]\cosh\left(\frac{W_{\mathrm{B}}}{L_{\mathrm{eB}}}\right)-\left[\exp\left(\frac{qV_{\mathrm{BC}}}{kT}\right)-1\right]\right\}$$

$$J_{\mathrm{hE}} = -\frac{qD_{\mathrm{hE}}p_{\mathrm{0E}}}{L_{\mathrm{hE}}}\left[\exp\left(\frac{qV_{\mathrm{BE}}}{kT}\right)-1\right]$$

$$\gamma_{\mathrm{F}} = \frac{1}{1+\dfrac{D_{\mathrm{hE}}p_{\mathrm{0E}}L_{\mathrm{eB}}}{D_{\mathrm{eB}}n_{\mathrm{0B}}L_{\mathrm{hE}}}\tanh\left(\dfrac{W}{L_{\mathrm{eB}}}\right)}$$



一般的なトランジスタの場合，$W \ll L_{eB}$となっているので，
$\tanh(W/L_{eB}) \fallingdotseq W/L_{eB}$と近似できる．

$$\boxed{\gamma_{\mathrm{F}} \approx \frac{1}{1+\dfrac{D_{\mathrm{hE}}p_{\mathrm{0E}}L_{\mathrm{eB}}W}{D_{\mathrm{eB}}n_{\mathrm{0B}}L_{\mathrm{hE}}L_{\mathrm{eB}}}} = \frac{1}{1+\dfrac{\mu_{\mathrm{hE}}p_{\mathrm{0E}}W}{\mu_{\mathrm{eB}}n_{\mathrm{0B}}L_{\mathrm{hE}}}}}$$

エミッタ効率を高めるには？

$$\gamma_F = \frac{1}{1 + \dfrac{\mu_{hE} p_{0E} W}{\mu_{eB} n_{0B} L_{hE}}}$$

$\dfrac{\mu_{hE} p_{0E} W}{\mu_{eB} n_{0B} L_{hE}}$ の値をなるべく小さくしたい

$$\frac{\mu_{hE} \boxed{p_{0E}} W}{\mu_{eB} \boxed{n_{0B}} L_{hE}} \qquad \boxed{p_{0E}} = \frac{n_i^2}{n_{0E}} \approx \frac{n_i^2}{\boxed{N_{DE}}} \qquad \boxed{n_{0B}} = \frac{n_i^2}{p_{0B}} = \frac{n_i^2}{\boxed{N_{AB}}}$$

N_{DE}を大きく，N_{AB}を小さくすればよい

ベース不純物は少なく（アクセプタを少なく）
エミッタ不純物は多く（ドナーを多く）

n_i	真性キャリア密度
N_{DE}	エミッタのドナー密度
N_{AB}	ベースのアクセプタ密度

ベース輸送効率

理想的なトランジスタ

ベースに注入された少数キャリアが100%コレクタに到達

必要事項：　ベースでの再結合が少ないこと

その程度を表す指標：

$$\text{ベース輸送効率}\quad \alpha_T = \frac{\text{コレクタ側への到達電子電流}}{\text{エミッタ側からの注入電子電流}}$$

ベース輸送効率が１に近い，ということの意味

エミッタからの注入電子➔ほぼ全てコレクタに到達（再結合ほとんど無し）

その程度を表す式：

$$\alpha_{\mathrm{T}} = \left.\frac{I_{\mathrm{eC}}}{I_{\mathrm{eE}}}\right|_{V_{\mathrm{BC}}=0}$$

ベース輸送効率を表す式

$$\alpha_{\mathrm{T}} = \left.\frac{J_{\mathrm{eC}}}{J_{\mathrm{eE}}}\right|_{V_{\mathrm{BC}}=0} = \frac{1}{\cosh\left(\dfrac{W}{L_{\mathrm{eB}}}\right)}$$

V_{BC}=0のとき

$$J_{\mathrm{eE}} = -\frac{qD_{\mathrm{eB}}n_{0\mathrm{B}}}{L_{\mathrm{eB}}\tanh\left(\dfrac{W}{L_{\mathrm{eB}}}\right)}\exp\left(\frac{qV_{\mathrm{BE}}}{kT}\right)$$

$$J_{\mathrm{eC}} = -\frac{qD_{\mathrm{eB}}n_{0\mathrm{B}}}{L_{\mathrm{eB}}\sinh\left(\dfrac{W}{L_{\mathrm{eB}}}\right)}\exp\left(\frac{qV_{\mathrm{BE}}}{kT}\right)$$

一般的なトランジスタの場合，
$W<<L_{eB}$となっているので，
$\cosh(W/L_{eB}) ≒ 1+(W/L_{eB})^2$
と近似できる.

$$\frac{1}{\cosh(W/L_{\mathrm{eB}})} \approx \left(1+\frac{(W/L_{\mathrm{eB}})^2}{2}\right)^{-1} \approx 1-\frac{(W/L_{\mathrm{eB}})^2}{2}$$

$$\cosh(x) = \frac{e^{x}+e^{-x}}{2} = 1+\frac{x^2}{2!}+\frac{x4}{4!}+\cdots$$

$$\alpha_{\mathrm{T}} \approx 1-\frac{(W/L_{\mathrm{eB}})^2}{2}$$

ベース輸送効率を高めるには？

$$\alpha_{\mathrm{T}} \approx 1 - \frac{\left(W / L_{\mathrm{eB}}\right)^2}{2}$$

$\dfrac{W}{L_{\mathrm{eB}}}$ の値をなるべく小さくしたい

Wを小さく，Leを大きく

ベース厚みはなるべく薄く
ベース中の電子の拡散長がなるべく長くなるように

まとめ

エミッタ効率に関係する指針

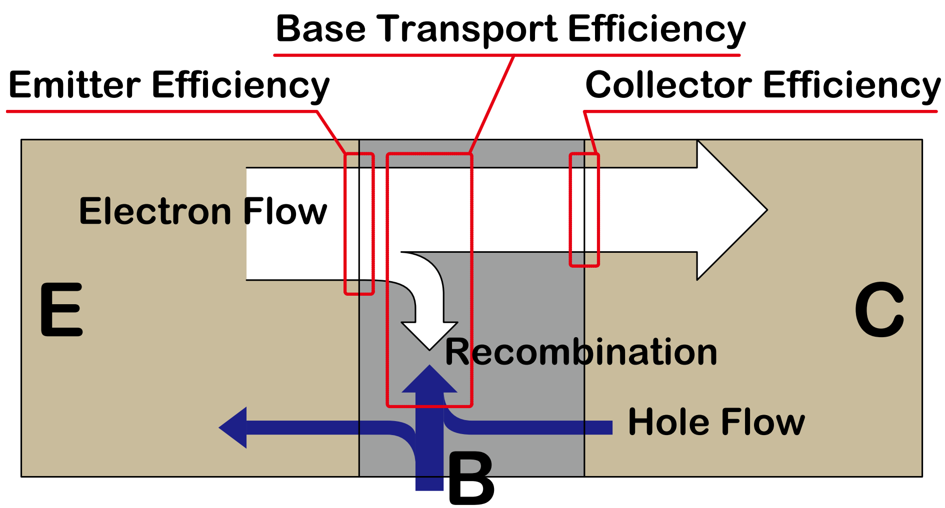
ベース不純物は少なく（アクセプタを少なく）
エミッタ不純物は多く（ドナーを多く）

$$\gamma_F = \frac{1}{1 + \dfrac{\mu_{hE} p_{0E} W}{\mu_{eB} n_{0B} L_{hE}}}$$

ベース輸送効率に関係する指針

ベース厚みはなるべく薄く
ベース中の電子の拡散長は長く

$$\alpha_T \approx 1 - \frac{(W / L_{eB})^2}{2}$$



トランジスタの応答速度

ベース走行時間
少数キャリアの蓄積

ベース走行時間

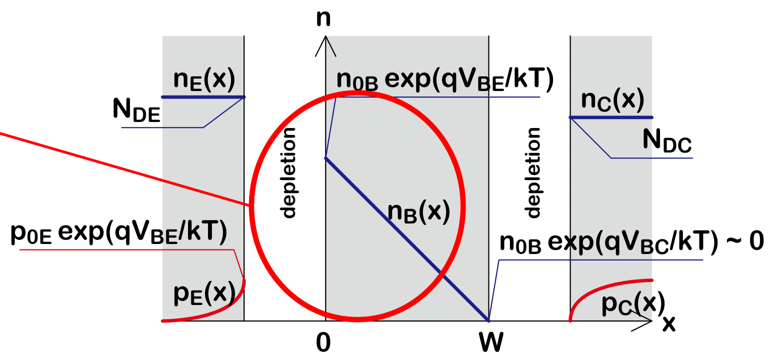
$$\tau_{\mathrm{t}} = \frac{W^2}{2D_{\mathrm{eB}}}$$

$$f_{\mathrm{t}} = \frac{1}{2\pi\tau_{\mathrm{t}}} = \frac{D_{\mathrm{eB}}}{W^2}$$

より高周波領域まで増幅できるようにするには

ベース領域を薄くする

$$J_{\mathrm{eB}} = qD_{\mathrm{eB}}\frac{\partial n_{\mathrm{B}}}{\partial x} = -\frac{qD_{\mathrm{eB}}n_{\mathrm{B}}}{\mathrm{W}} \Leftarrow n_{\mathrm{B}} = n_{0\mathrm{B}}\left(1-\frac{x}{W}\right)$$



ベース電流を平均電子密度<n>と平均速度<v>で表すと

$$J_{\mathrm{eB}} = q < n_{\mathrm{B}} >< v_{\mathrm{eB}} >= q\frac{n_{0\mathrm{B}}}{2} < v_{\mathrm{eB}} > \Leftarrow < n_{\mathrm{B}} >= \frac{n_{0\mathrm{B}}}{2}$$

平均速度<v>は,

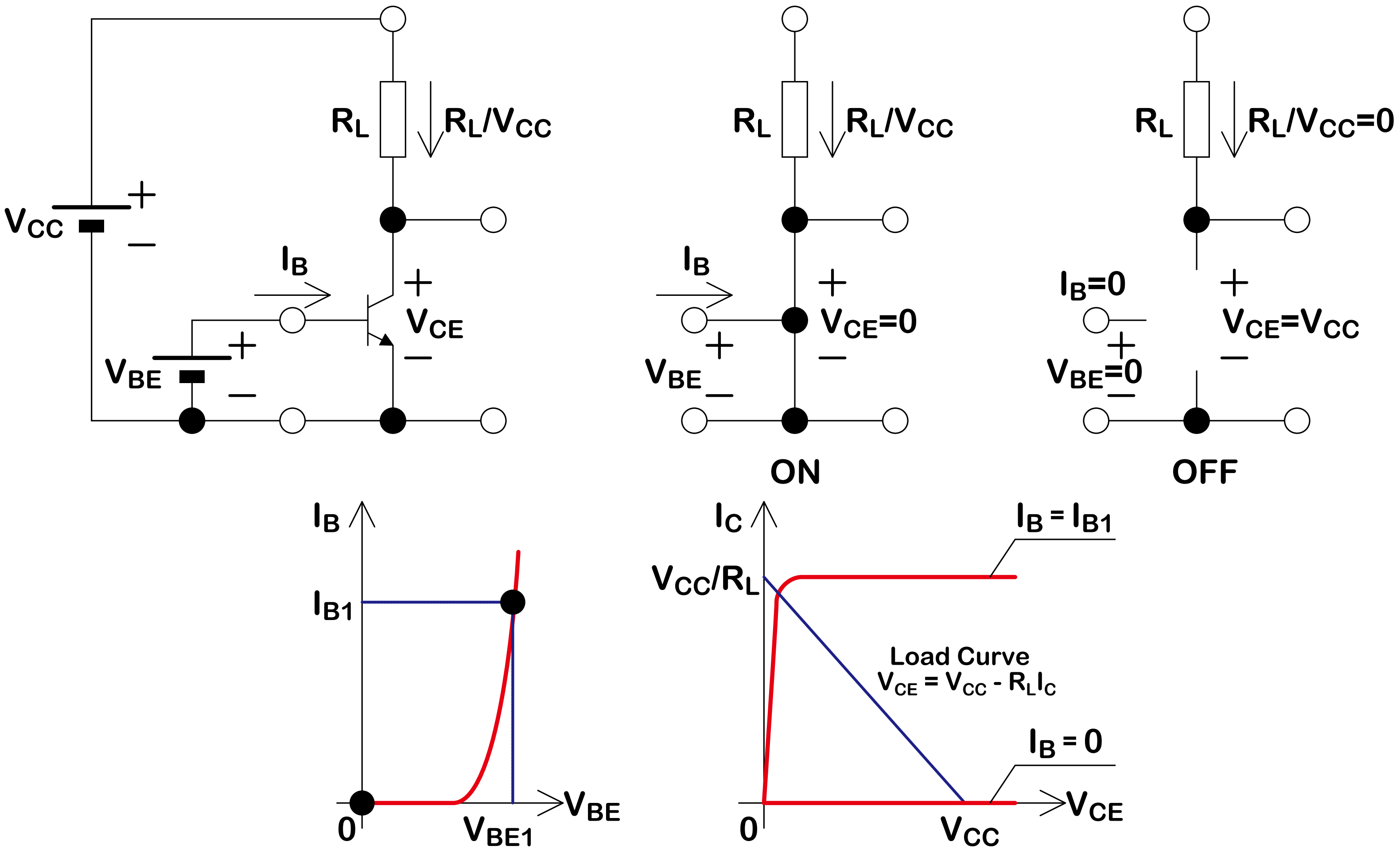
$$< v_{\mathrm{eB}} >= \frac{2D_{\mathrm{eB}}}{\mathrm{W}}$$

この速度でWを通過する時間は,

$$\Rightarrow \tau_t = \frac{W}{< v_{\mathrm{eB}} >} = \frac{\mathrm{W}^2}{2D_{\mathrm{eB}}}$$

トランジスタのスイッチング動作

I_Bが十分に大きいと，V_{CE}~0, I_C~V_{CC}/R_L → ON
I_B=0のとき，V_{CE}~V_{CC}, I_C~0 → OFF



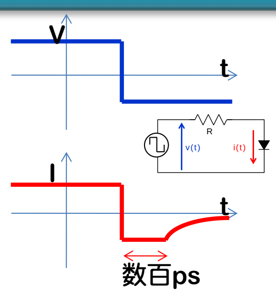
トランジスタのスイッチングの遅れ

ダイオードの時と同様

ベースに注入されていた少数キャリアが亡くなるまでに，
時間が掛かる

入力電圧が変わっても，すぐに出力電圧が変わらない．

小数キャリアの蓄積効果



p型に注入された少数キャリア（電子）が消滅し，
静特性のときの密度になるまでには多少時間が必要

(a) 順バイアス中
(b) 逆バイアス印加直後
(c) 境界での少数キャリア密度が熱平衡値になったとき
(d) 境界での少数キャリア密度の減少に従って、(c)から
(d)へと空乏層に印加されている電圧が逆方向になり，
印加された電圧に近づくために，電流が減少する．