

牧本俊樹著『固体物理と半導体物性の基礎』(コロナ社)における

演習問題の解答に対するヒント

【第1章】

1.1 2次元の正方形格子を用いて、基本並進ベクトルと基本単位格子を説明せよ。

(解答に対するヒント)

1.4.1 項で述べた並進ベクトルの解説と図 1.10 の例を用いて説明する。なお、補足の説明として、図 1.11 を利用しても良い。

1.2 ウィグナー-サイツ・セルを説明せよ。

(解答に対するヒント)

1.5 節で述べた解説を用いて説明する。

1.3 直交座標系の単位ベクトルを用いて、単純立方格子における基本並進ベクトルと基本単位格子を示せ。

(解答に対するヒント)

式(1.3)を示し、1.6.2 項で述べた解説を参照して解答する。

1.4 直交座標系の単位ベクトルを用いて、体心立方格子における基本並進ベクトルと基本単位格子を示せ。

(解答に対するヒント)

式(1.4)を示し、1.6.3 項で述べた解説を参照して解答する。

1.5 直交座標系の単位ベクトルを用いて、面心立方格子における基本並進ベクトルと基本単位格子を示せ。

(解答に対するヒント)

式(1.5)を示し、1.6.4 項で述べた解説を参照して解答する。

【第 2 章】

2.1 ブラッグの法則を説明せよ。

(解答に対するヒント)

2.1 節で述べた解説と式(2.1)や図 2.1 を用いて説明する。

2.2 ブラッグの法則と等価な回折条件について述べよ。

(解答に対するヒント)

2.5.2 項で述べたように、式(2.1)、式(2.7)、式(2.8) は、ともに同じ回折条件を示している。これらの三つの式を示し、ブラッグの法則に等価な二つの回折条件の名称を述べる。

2.3 3次元格子の基本並進ベクトルを使って、逆格子の基本並進ベクトルを示せ。

(解答に対するヒント)

式(2.4)を示し、2.3.1 項で述べた解説を用いて解答する。

2.4 実格子と逆格子の基本並進ベクトルの関係を説明せよ。

(解答に対するヒント)

式(2.6)を示し、2.3.3 項で述べた解説を用いて解答する。なお、クロネッカーのデルタについても説明すること。

2.5 2次元結晶格子の逆格子ベクトルを使って、「回折条件のベクトル表現」が「ブラッグの法則」と等価であることを示せ。

(解答に対するヒント)

2.5.1 項で述べた逆格子ベクトルの性質(ベクトルの向きと大きさ)を示し、2.5.2 項で述べた解説を用いて解答する。

【第3章】

3.1 ブリルアンゾーンを説明せよ。

(解答に対するヒント)

3.1.2 項で述べた解説を用いて解答する。

3.2 周期 a の 1 次元格子に対する逆格子を求めよ。そして、1 次元逆格子のブリルアンゾーンを求めよ。

(解答に対するヒント)

3.2 節で述べた解説を用いて、図 3.2(b)、および図 3.3(a)と(b)を示す。なお、第 3 ブリルアンゾーンを加えても良い。

3.3 2 次元正方形格子の逆格子において、第 1 ブリルアンゾーンから第 3 ブリルアンゾーンまでを求めよ。

(解答に対するヒント)

図 3.5 を示し、3.3 節で述べた解説を用いて解答する。

3.4 単純立方格子に対する逆格子の基本並進ベクトルを求めよ。そして、この逆格子に対するブラベ格子の名称と第 1 ブリルアンゾーンの形状について述べよ。

(解答に対するヒント)

式(1.3)を式(2.4)に代入して、逆格子の基本並進ベクトルを求める。この際に、3.4 節で述べた解説を用いて解答する。

3.5 体心立方格子に対する逆格子の基本並進ベクトルを求めよ。そして、この逆格子に対するブラベ格子の名称と第 1 ブリルアンゾーンの形状について述べよ。

(解答に対するヒント)

式(1.4)を式(2.4)に代入して、逆格子の基本並進ベクトルを求める。この際に、3.5 節で述べた解説を用いて解答する。

3.6 面心立方格子に対する逆格子の基本並進ベクトルを求めよ。そして、この逆格子に対するブラベ格子の名称と第 1 ブリルアンゾーンの形状について述べよ。

(解答に対するヒント)

式(1.5)を式(2.4)に代入して、逆格子の基本並進ベクトルを求める。3.6 節で述べた解説を用いて解答する。

【第4章】

4.1 同種原子からなる1次元格子中のフォノンに対する ω - k 分散関係を求めよ。その際に、運動方程式の解が

$$u_s = A \exp[i(ska - \omega t)]$$

であることを用いよ。

(解答に対するヒント)

まずは、図 4.1 の四角の枠で囲まれた関係から式(4.2)の運動方程式を示す。次に、問題で与えられた式を式(4.2)に代入し、4.2.2項での解説を参照して式(4.5)の ω - k 分散関係を求める。

4.2 問題 4.1 で得られた ω - k 分散関係を図示し、第1ブリルアンゾーンを示せ。

(解答に対するヒント)

図 4.2 を示し、4.2.2 項での解説を参照して解答する。

4.3 問題 4.1 において、原子の間隔よりも波長が長い領域での ω - k 分散関係を求め、その物理的な意味を述べよ。

(解答に対するヒント)

4.2.3 項での解説を参照して解答する。

4.4 二つの異種原子からなる1次元格子中のフォノンに対しては、以下の二つの関係式が得られる。これらの式を用いて、ブリルアンゾーンの原点、およびブリルアンゾーン端における ω の値を求めよ。

$$-\omega^2 M_1 A = CB [1 + \exp(-ika)] - 2CA$$

$$-\omega^2 M_2 B = CA [1 + \exp(ika)] - 2CB$$

(解答に対するヒント)

問題で与えられた二つの関係式から式(4.11)を導き、4.3.3項や4.3.4項での解説を参照して解答する。

4.5 問題 4.4 で求めた値などを用いて、 k と ω の関係を図示し、その関係における物理的な特徴を述べよ。

(解答に対するヒント)

図 4.4 を示し、4.3.5 項での解説を参照して解答する。

4.6 音響フォノンと光学フォノンについて説明せよ。

(解答に対するヒント)

図 4.4 で示した ω - k 分散関係と図 4.5 で示した振動モード、および 4.4.1 項での解説を参照して解答する。さらに、4.4.2 項で示した四つのフォノンの種類についても言及する。

4.7 フォノン比熱の温度特性について述べよ。

(解答に対するヒント)

図 4.7 を示し、それぞれの温度領域で支配的な法則やモデルを解答する。そして、アインシュタインモデルの概要についても説明する。なお、式(4.23)や図 4.7 の縦軸の値は無理に暗記する必要はない。

4.8 アインシュタインモデルを使って、式(4.23) で与えられるフォノンの比熱を導け。

(解答)

調和振動子のエネルギー E は量子化されており、以下の式で表される。

$$E = (n + 1/2) \hbar\omega \quad (n : \text{整数})$$

ただし、 \hbar は換算プランク定数、 ω は角振動数である。この式から、量子化されたエネルギーの間隔は等間隔 $\hbar\omega$ になる。

ここで、フォノンの分布がボルツマン分布に従うので、 n 番目と $n+1$ 番目の励起準位にあるフォノンの割合は、 n 番目の準位にあるフォノンの数を N_n として、

$$N_{n+1} / N_n = \exp(-\Delta E / k_B T) = \exp(-\hbar\omega / k_B T)$$

の関係がある。ただし、 k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度である。

したがって、 n 番目の量子状態を取る振動子がすべての振動子に対する割合は、

$$\frac{N_n}{\sum_s N_s} = \frac{\left[\exp\left(\frac{-\hbar\omega}{k_B T}\right) \right]^n}{\sum_{s=1}^{\infty} \left[\exp\left(\frac{-\hbar\omega}{k_B T}\right) \right]^s} = \frac{\exp\left(\frac{-n\hbar\omega}{k_B T}\right)}{\sum_{s=1}^{\infty} \exp\left(\frac{-s\hbar\omega}{k_B T}\right)}$$

である。

ここで、励起した振動子の量子数の平均値 $\langle n \rangle$ は、

$$\langle n \rangle = \frac{\sum_{s=0}^{\infty} s x^s}{\sum_{s=0}^{\infty} x^s} \quad \text{ただし、} x = \exp(-\hbar\omega / k_B T) < 1$$

で与えられる。

また、 $|x| < 1$ の場合は、 $s \rightarrow \infty$ での等比級数の和は、

$$\sum_{s=0}^{\infty} x^s = \frac{1}{1-x}$$

である。

さらに、

$$\sum_{s=0}^{\infty} s x^s = \lim_{s \rightarrow \infty} \left[x \frac{\partial (\sum x^s)}{\partial x} \right] = x \frac{\partial \left(\frac{1}{1-x} \right)}{\partial x} = \frac{x}{(1-x)^2}$$

である。

以上の二つの式を使うことにより

$$\langle n \rangle = \frac{\left[\frac{x}{(1-x)^2} \right]}{\left[\frac{1}{1-x} \right]} = \frac{x}{1-x} = \frac{1}{\left[\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - 1 \right]}$$

比熱のインシュタインモデルでは、 N 個の原子を互いに独立な $3N$ 個の調和振動子とみなし、単一周波数で振動する調和振動子を仮定する。1個の調和振動子の平均エネルギーは $[\langle n \rangle + 1/2] \times \hbar\omega$ で与えられるので、 $3N$ 個の振動子の平均エネルギー U は

$$U = 3N \left(\langle n \rangle + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega = 3N\hbar\omega \left[\frac{1}{\left[\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - 1 \right]} + \frac{1}{2} \right]$$

この式を定積比熱の定義に代入することにより、

$$C_V \equiv \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = \frac{3Nk_B \left(\frac{\hbar\omega}{k_B T} \right)^2 \exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right)}{\left[\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - 1 \right]^2} = \frac{3Nk_B x^2 e^x}{(e^x - 1)^2}$$

を得ることができる。

【第5章】

5.1 高さが無限大の壁を持つ1次元井戸型ポテンシャル中の $\Psi(x)$ の一般解は

$$\Psi(x) = A \sin(k_x x) + B \cos(k_x x)$$

で与えられる。この $\Psi(x)$ を求め、その物理的な意味について述べよ。

(解答に対するヒント)

シュレディンガーの波動方程式を示し、問題で与えられた式を代入する。そして、5.2.2項と5.2.3項の解説を参照して解答する。

5.2 フェルミエネルギーを説明せよ。

(解答に対するヒント)

5.2.4項の解説を参照して解答する。

5.3 一辺が L の立方体に閉じ込められた電子に対して、エネルギー E_F 以下の電数を求めよ。ただし、立方体の表面には電子が存在しない。そして、電子の存在確率には立方体ごとの周期性があり、1次元井戸のエネルギー固有値は $[\hbar^2/(2m)]k_x^2$ で与えられるものとする。

(解答に対するヒント)

問題で与えられた1次元井戸のエネルギー固有値と3次元のシュレディンガー方程式から、式(5.9)の関係式を予想する。そして、この関係式を用いて、5.3.2項の解説を参照して解答する。

5.4 問題5.3で求めた結果を利用して、一辺が L の立方体に閉じ込められた電子に対して、状態密度とエネルギーの関係を求めよ。

(解答に対するヒント)

5.3.3項の解説を参照して解答する。

5.5 フェルミ-ディラックの分布関数を説明せよ。

(解答に対するヒント)

5.4節の解説を参照して解答する。

【第6章】

6.1 金属・絶縁体・真性半導体のエネルギーバンド図を示し、それぞれのバンド図の特徴を述べよ。

(解答に対するヒント)

図 6.1 のエネルギーバンド図を示し、6.1.2 項の解説を参照して解答する。

6.2 問題 6.1 で得られたエネルギーバンド図を用いて、各材料の電気伝導特性を説明せよ。

(解答に対するヒント)

6.1.3 項から 6.1.5 項の解説を参照して解答する。

6.3 ブロッホの定理を説明せよ。

(解答に対するヒント)

式(6.2)を示し、この式に関連する解説を参照して解答する。また、6.2.2 項に示した 3 次元結晶に関するブロッホの定理も説明に加えると良い。

6.4 クローニツヒ-ペニーのモデルで用いるポテンシャル形状を示し、1 次元のシュレディンガーの波動方程式を示せ。さらに、このシュレディンガーの波動方程式を解く際に用いる境界条件を示せ。

(解答に対するヒント)

図 6.4 を示し、そのポテンシャル形状の名称を述べる。また、6.3.1 項で説明した四つの境界条件を示す。

6.5 クローニツヒ-ペニーのモデルによって得られる結論を述べよ。そして、このモデルによって得られた $E-k$ 分散関係を還元ゾーン方式で示し、その意味について述べよ。

(解答に対するヒント)

6.4.1 項での議論の結論をまとめる。そして、図 6.9 を示し、6.4.3 項の解説を参照して、この図 6.9 の意味を述べる。

6.6 式(6.8) で示した $P \sin \theta / \theta + \cos \theta = \cos(ka)$ の方程式において、 $P \rightarrow 0$ 、あるいは $P \rightarrow \infty$ とした場合に得られる結果について考察せよ。

(解答)

① $P \rightarrow 0$ の場合

$$P \sin \theta / \theta + \cos \theta = \cos ka$$

において、 $P=0$ とおくと、

$$\cos \theta = \cos ka$$

が得られるので、 $\alpha a = ka$ となる。ここで、 $\alpha^2 = (2m)/\hbar^2 E$ (定義)であるので、

$$E = \hbar^2/(2m) k^2$$

が得られる。この関係は、自由電子の E - k 分散関係を示している。このことは、($b \rightarrow 0$ でも良いが)ポテンシャルエネルギー $U_0 \rightarrow 0$ に対応することからも理解できる。

② $P \rightarrow \infty$ の場合

問題で与えられた式の両辺を P で割った

$$\sin \theta / \theta + \cos \theta / P = \cos ka / P$$

の式において、 $1/P = 0$ を代入することにより、 $\sin \theta = 0$ となる。したがって、 $\theta = n\pi$ が得られ、定義式から、 $\theta = \alpha a$ 、 $\alpha^2 = (2m)/\hbar^2 E$ であるので、

$$E = \hbar^2/(2m) (n\pi/a)^2$$

が得られる。この E は、無限大の障壁層を持つ井戸幅 a の一次元量子井戸中のエネルギー固有値を示している。このことは、 $U_0 \rightarrow \infty$ に対応していることから理解できる。

6.7 直接遷移型半導体と間接遷移型半導体の例をあげ、これらの半導体における光の吸収特性の違いについて説明せよ。

(解答に対するヒント)

図 6.11 と図 6.12 を示し、6.5.2 項と 6.5.3 項の解説を参照して説明する。

【第7章】

7.1 有効質量を説明し、群速度と電子のエネルギーを使って有効質量を表す式を求めよ。

(解答に対するヒント)

7.1 節の解説を参照して、有効質量に関する式(7.3)を求める。

7.2 ドリフト電流の定義から、電流密度 J と電界 E の関係を求め、その意味を述べよ。

7.2 節の解説を参照して、 J と E の関係式(7.4)を求める。この式(7.4)は「オームの法則」を示している。

7.3 移動度を説明し、ドルーデの理論を使って移動度を表す式を求めよ。

(解答に対するヒント)

7.3 節の解説を参照して、 $\mu = \tau q/m^*$ を求める。

7.4 半導体の平板(厚さ d , 幅 W)に、断面に垂直な方向に正孔電流 I_x を流し、平板に垂直な方向に磁場 B_z を印加したことを想定し、ホール電圧とホール係数を求めよ。

(解答に対するヒント)

7.4 節の解説を参照して、式(7.9)と R_H の式を求める。

【第 8 章】

8.1 半導体材料が多くのデバイスなどに使われている理由を踏まえ、半導体の特長を述べよ。

(解答に対するヒント)

8.1.1 項の解説を参照して解答する。本書では、半導体に関する四つの特長を挙げたが、この他の特長を挙げても良い。

8.2 ベガード則を説明せよ。そして、青色 LED に用いる InGaN 層における In 組成を求めよ。ただし、InN および GaN の E_g は、それぞれ、0.7 eV と 3.4 eV であるとする。また、青色の光の波長は 480 nm であり、InGaN 混晶はベガード則に従うと仮定する。

(解答に対するヒント)

付録 A.3 の④で示した式を用いて、480 nm の波長は 2.58 eV の光のエネルギーに対応する。そして、ベガード則を用いると、この光のエネルギーに対応するバンドギャップエネルギーを持つ InGaN 層における In 組成は 0.30 となる。

なお、実際には、InGaN 層のバンドギャップエネルギーはベガード則の計算からずれることが知られているので、その補正が必要である。

8.3 半導体のバンドギャップエネルギーが、半導体デバイスの特性に及ぼす影響を説明せよ。

(解答に対するヒント)

8.2.1 項の解説を参照して解答する。

8.4 Si 結晶の第 1 ブリルアンゾーンの形状を述べ、 Γ 点、X 点、L 点について説明せよ。

(解答に対するヒント)

8.4.1 項の解説や図 8.3 を参照して解答する。

8.5 Si, Ge, GaAs の各半導体に対して、伝導帯の底 E_C の位置を示せ。そして、各半導体に対して、 E_C 付近における等エネルギー面の性質について説明せよ。

(解答に対するヒント)

8.4.2 項と 8.4.3 項の解説を参照して解答する。

なお、図 8.4、図 8.6、図 8.7 のグラフの詳細を無理に暗記する必要はない。ただし、各半導体の E_C と E_V の位置や等エネルギー面の性質は覚えておくこと。

【第9章】

9.1 フェルミ-ディラックの分布関数の近似について述べよ。

(解答に対するヒント)

9.1 節の解説を参照して解答する。

9.2 伝導帯の有効状態密度を説明せよ。

(解答に対するヒント)

式(9.8)とそれに関連する解説、および 9.2.2 項の解説を参考に解答する。なお、式(9.6)を無理に暗記する必要はない。

9.3 熱平衡状態における半導体中の電子濃度と正孔濃度の積を求め、その物理的な意味を述べよ。

(解答に対するヒント)

9.4.1 項の解説を参照して解答する。

9.4 真性半導体におけるフェルミ準位の位置を計算し、その位置について説明せよ。

(解答に対するヒント)

9.4.3 項の解説を参照して解答する。

9.5 Si 半導体中のドナー不純物およびアクセプタ不純物の例をあげよ。

(解答に対するヒント)

9.5.1 項と 9.5.2 項の解説を参照して解答する。

9.6 ボーアの水素原子モデルを使って、半導体中の不純物準位を求めよ。ただし、角運動量は量子化されており、 $n\hbar$ (n : 自然数) で表される。

(解答に対するヒント)

まずは、9.6.1 項の解説をもとに、水素原子の活性化エネルギー E を求める。次に、9.6.2 項の解説に従って、 E に含まれるパラメータを置き換えることにより、半導体中の不純物の活性化エネルギーを求める。

9.7 n 型半導体において、イオン化ドナーと中性ドナーが同数の場合の E_F の位置について述べよ。

(解答に対するヒント)

9.8.1 項の解説を参照して解答する。

9.8 n 型半導体における電子濃度と、フェルミ準位の位置の温度依存性について説明せよ。

(解答に対するヒント)

図 9.12 を示し、9.8.1 項から 9.8.3 項までの解説を参照して解答する。

【第 10 章】

10.1 移動度を決定する主な散乱要因をあげ、それぞれの散乱要因の特徴を述べよ。
(解答に対するヒント)

10.1.1 項の解説を参照して解答する。

10.2 移動度に関するマティーンセンの法則を説明せよ。

(解答に対するヒント)

10.1.2 項の解説を参照して解答する。そして、マティーンセンの法則を利用した例として、図 10.1 を示すと良い。

10.3 拡散電流を説明し、1 次元モデルを使って、電子と正孔に対する半導体中の電流密度を示せ。

(解答に対するヒント)

10.3.1 項で示したフィックの法則を説明し、正孔による拡散電流の式(10.4)を示す。そして、半導体中の電流密度として、式(10.5)と式(10.6)を示す。

10.4 拡散定数を求めるための思考実験のモデルを示し、アインシュタインの関係式を導け。

(解答に対するヒント)

図 10.3 を示し、式(10.4)、および式(10.7)から式(10.13)を用いて、アインシュタインの関係式(10.14)を導く。

10.5 過剰少数キャリア濃度を定める四つの要因をあげよ。

(解答に対するヒント)

10.6.1 項の解説を参照して四つの要因を解答する。

10.6 n 型半導体において、1 次元での少数キャリアの連続の式を示せ。

(解答に対するヒント)

式(10.28)を示す。その際に、各記号が示す物理量の名称を記述する。さらに、上記の間 10.5 で示した四つの要因の中で、各項がどの要因に対応しているかも記述する。

【第 11 章】

11.1 電圧を印加していない場合の pn 接合のエネルギーバンド図を示せ。そして、pn 接合ダイオードの特性を決定するパラメータをあげよ。

(解答に対するヒント)

図 11.5 を示し、図中の記号が示す物理量の名称を記述する。また、式(11.1)を示して、拡散電位とバンドギャップエネルギーの関係を示す。

11.2 順方向バイアス、および逆方向バイアスを印加した場合のエネルギーバンド図を示せ。そして、両者のエネルギーバンド図の差異について説明せよ。

(解答に対するヒント)

図 11.6 と図 11.7 を示す。そして、両者の E_F の位置と空乏層幅の違いを説明する。

11.3 ドナー濃度が N_d 、アクセプタ濃度が N_a の階段型 pn 接合に対するポアソン方程式を示せ。

(解答に対するヒント)

式(11.3)を示す。

11.4 階段型 pn 接合に対するポアソン方程式を解く際に必要となる境界条件などをあげよ。

(解答に対するヒント)

11.3.3 項の解説を参照して解答する。 $d\phi(x)/dx$ に関する二つの条件、および $\phi(x)$ に関する二つの境界条件がある。さらに、これらに加えて、電荷中性条件を示す。

11.5 電圧を印加しないときの空乏層幅は以下の式で与えられる。

$$w = [2 \epsilon_s V_{bi} (N_a + N_d) / (q N_a N_d)]^{1/2}$$

この式を使って、p 型層に電圧 V を印加した場合の接合容量を示せ。

(解答に対するヒント)

11.4.2 項の解説で示したように、接合容量は、平板コンデンサと同じ式で表現できる。また、電圧を印加した場合には、11.4.1 項で示したように、問題で与えられた式の V_{bi} を置き換えれば良い。

11.6 問 11.5 で得られた容量と電圧の関係から、pn 接合ダイオードのパラメータを測定する方法について述べよ。

(解答に対するヒント)

式(11.12)を示し、11.4.3 項の解説を参照して解答する。なお、なお、図 11.14 は一つの例であり、縦軸や横軸の値は重要でない。 $1/C^2$ と V が直線関係になることが重要である。

11.7 pn 接合ダイオードに電圧を印加しない場合、および順方向バイアス $V(> 0)$ を印加した場合に、n 型半導体と p 型半導体の空乏層端における正孔濃度の関係を示せ。ただし、キャリアの分布はボルツマン分布に従うとする。そして、これらを用いて、n 型半導体側の空乏層端における正孔濃度 $p_n(w_n)$ を求めよ。

(解答に対するヒント)

11.5.1 項の解説を参照して、電子濃度の場合と同様にして、式(11.17)を導く。

11.8 n 型半導体中での正孔濃度は次の式で与えられる。

$$p_n(x) = p_{n0} + [p_n(w_n) - p_{n0}] \exp [-(x - w_n)/L_p]$$

この式を使って、空乏層中でのキャリアの再結合が無視できると仮定して、理想的な pn 接合ダイオードにおける電流密度を求めよ。

(解答に対するヒント)

11.5.2 項の解説を参照して解答する。

まず、問 11.7 の結果を問題で与えられた式に代入する。そして、得られた式を拡散電流密度の定義式(10.4)に代入して、式(11.21)を得る。さらに、この式(11.21)を用いて、n 型半導体の空乏層端における正孔による拡散電流密度を求める。同様にして、p 型半導体の空乏層端における電子による拡散電流密度を求める。そして、空乏層におけるキャリアの再結合が無視できるので、両者の拡散電流密度の合計が pn 接合を流れる全電流密度となる。

11.9 理想係数を説明し、実際の $I-V$ 特性から理想係数を求める方法について述べよ。

(解答に対するヒント)

式(11.28)を示し、11.6 節の解説を参照して解答する。拡散電流や再結合電流に対する n の値や $n > 2$ となる要因について述べる。

11.10 n 型半導体ショットキーダイオードに電圧を印加していない場合のエネルギーバンド図を示せ。そして、ショットキーダイオードの特性を決定するパラメータを示し、これらのパラメータ間の関係式を示せ。

(解答に対するヒント)

図 11.23 のエネルギーバンド図を示し、11.7.2 項の解説を参照してパラメータ間の関係を解答する。

11.11 電子の分布がボルツマン分布に従うと仮定して、n 型半導体を用いたショットキーダイオードにおける順方向バイアス時の $I-V$ 特性の式を導け。

(解答に対するヒント)

図 11.27 のエネルギーバンド図を示し、11.7.5 項の解説を参照して、式(11.36)を導く。余裕があれば、式(11.37)を示す。

【第 12 章】

12.1 バイポーラトランジスタの構造例を示し、その動作について説明せよ。

(解答に対するヒント)

図 12.2 の構造を示し、12.1.1 項の解説を参照して説明する。

12.2 バイポーラトランジスタにおけるエミッタ接地回路の電流成分を決める三つのパラメータをあげ、それらを利用して電流増幅率を表現せよ。

(解答に対するヒント)

12.2.1 項の解説を参照して三つのパラメータを示す。そして、12.2.2 項の解説や図 12.6 を参照して式(12.3)を導く。

12.3 以下の二つの式などを使って、エミッタ接地回路における電流増幅率を大きくするためのバイポーラトランジスタの設計を行え。

$$\gamma \doteq [1 + (D_p/D_n) \cdot (W/L_p) \cdot (N_B/N_E)]^{-1}$$
$$\alpha_T \doteq 1 - (1/2) (W/L_n)^2$$

(解答に対するヒント)

12.2.2 項の解説を参照して解答する。

β を大きくするためには、 γ および α_T をともに 1 に近づける必要がある。この条件を用いて、問題で与えられた式に含まれる各パラメータの条件を求める。さらに、ベース層のパンチスルーを抑制するための条件を求める。以上の条件をまとめて、トランジスタの構造と半導体材料の特性に関する条件に分けて、バイポーラトランジスタの設計を行う。

12.4 電界効果トランジスタの構造例を示し、その動作について説明せよ。

(解答に対するヒント)

図 12.8(a) の構造を示し、12.4.1 項の解説を参照して説明する。

12.5 n 型 MOSFET のゲート電極の下に存在する 2 種類の電荷をあげよ。そして、ゲート電圧を印加した際に、ゲート電圧とこれらの 2 種類の電荷の関係を説明せよ。

(解答に対するヒント)

図 12.13 を示す。そして、式(12.8)から式(12.10)を使って、12.4.3 項の解説を参照して説明する。

12.6 n 型 MOSFET において、ドレイン電圧とともに表面反転層がどのように変化するかを説明せよ。

(解答に対するヒント)

図 12.15(a)から(c)を示し、12.4.4 項の解説を参照して解答する。

12.7 n 型 MOSFET における飽和ドレイン電流は以下の式で与えられる。

$$(I_{DS})_{\text{sat}} = W\mu C_{ox} (V_{GS} - V_{th})^2 / 2L$$

この式を使って、単位ゲート幅当りの相互コンダクタンスを計算し、n 型 MOSFET の設計を行え。

(解答に対するヒント)

12.5.2 項の解説を参照して解答する。

問題で与えられた式を g_m の定義式(12.12)に代入して g_m を計算する。そして、FET の構造と材料の特性の条件に分けて、n 型 MOSFET の設計を行う。

【第 13 章】

13.1 真性半導体からなるタイプ I の超格子構造と単一量子井戸構造に対するエネルギーバンド図を示せ。そして、このタイプ I の量子井戸構造が発光デバイスに利用される理由を述べよ。

(解答に対するヒント)

図 13.2 を示し、13.1.1 項で解説したように ΔE_C と ΔE_V を他のパラメータで示す。そして、図 13.3(a) のエネルギーバンド図を示し、13.1.2 項の解説を参照して発光デバイスに利用される理由を述べる。

13.2 半導体中での電子とフォトンの相互作用である光吸収、自然放出、誘導放出の速度を示せ。ただし、価電子帯の電子濃度、伝導帯の電子濃度、半導体に照射する光強度を、それぞれ、 n_V 、 n_C 、 ρ とする。そして、これらの条件を使って、レーザー発振に必要な条件を示せ。さらに、それぞれの相互作用を利用した半導体光デバイスの例をあげよ。

(解答に対するヒント)

13.2 節の解説を参照して、三つの相互作用の速度を示す。そして、これらの速度を用いて、誘導放出が支配的になる二つの条件を求めよ。さらに、13.2 節を参照して、光デバイスの例をあげる。

13.3 半導体表面にフォトン照射した場合に、吸収係数 α が一定として、表面から x の位置でのフォトン数を求めよ。また、実際の半導体において、光吸収に影響を与えるパラメータや要因をあげよ。

(解答に対するヒント)

13.3 節の解説を参照して、式(13.2)と式(13.3)を用いてフォトン数を求めよ。

また、 α に影響を与える光の波長やバンドギャップエネルギーのパラメータ、そして、半導体のバンド構造とともに、13.4 節で紹介した二つの現象を解答する。なお、本書で紹介した現象以外にも α に影響を与える要因があるので、それらを調べて解答しても良い。

13.4 半導体の発光デバイスと受光デバイスの例をあげよ。そして、それらの発光デバイスに共通して用いられる主な接合の名称を答えよ。

(解答に対するヒント)

発光デバイスとしては、LED や LD がある。受光デバイスとしては、太陽電池やフォトダイオードがある。これらのデバイスでは、pn 接合とオーミック接合が用いられている。