

- 解答例に関して: 院試の問題について受験生同士で議論できればなあ, と作りました. 解答例が正答であることは保証しません. 間違えてたり, もっといい方法があれば指摘して欲しいと思います.

## b – 5 (半導体) 解答例 2009.07.19

- (i) 半導体に入射する光の強度 (単位時間あたり単位面積あたりのエネルギー) は  $I_0$ . 光子 1 個あたりのエネルギーは  $hc/\lambda$  なので, 単位面積, 単位時間あたりに入射する光子数  $n$  は

$$n = I_0 \cdot \left(\frac{hc}{\lambda}\right)^{-1} = \frac{\lambda}{hc} I_0. \quad (1)$$

- (ii)  $\alpha$  は吸収係数とよばれる.

- (iii) 吸収係数  $\alpha$  は, 入射光の波長  $\lambda$  に依存する.  $\alpha$  は, 光子の吸収されやすさと関係がある. 光子が全く吸収されない場合,  $\alpha$  は 0 であるし, 吸収されやすい場合は  $\alpha$  は大きくなる.

説明のため, 禁制帯幅  $E_g$  に対応する波長として  $\lambda_g$  を定義する.  $\lambda_g$  は  $hc/\lambda_g = E_g$  を満たす. 入射光の波長  $\lambda$  が  $\lambda_g$  より大きい場合 (つまり光子のエネルギーが禁制帯幅を超えない場合), 光子の吸収はほとんどないので  $\alpha$  は基本的に 0 である. ただし, 実際には不純物や格子欠陥による吸収や, 励起子を生成する吸収があるためいずれの  $\lambda$  でも  $\alpha = 0$  というわけではない.

$\lambda \leq \lambda_g$  では,  $\alpha$  は 0 より大きい値を持つ.  $\lambda = \lambda_g$  では  $\alpha$  はほとんど 0 に近いが, これは光子がバンドギャップと完全に一致するエネルギーしか持っておらず, 光子の吸収があまりないためである.  $\lambda$  が小さくなると, 光子吸収される確率が高くなるため,  $\alpha$  は大きくなる.

(ここでは図は描かないが, 実際の解答では  $\lambda - \alpha$  のグラフや, 半導体内の光学遷移の図などを描いて説明するとわかりやすくて良いと思う.)

- (iv) 光子数は光の強度に比例するため, 位置  $x$  における光子数  $n_{\text{ph}}(x)$  は

$$n_{\text{ph}}(x) = n_{\text{ph}}(0) \cdot e^{-\alpha x} \quad (2)$$

で表される.  $x = 1/\alpha$  での光子数は

$$n_{\text{ph}}(1/\alpha) = n_{\text{ph}}(0) \cdot e^{-\alpha \cdot \frac{1}{\alpha}} \quad (3)$$

$$= n_{\text{ph}}(0) \cdot e^{-1} \quad (4)$$

$$= n_{\text{ph}}(0) \cdot \frac{1}{2.7} \quad (5)$$

$$= 0.37 \cdot n_{\text{ph}}(0). \quad (6)$$

よって失われた光子数は

$$n_{\text{ph}}(0) - n_{\text{ph}}(1/\alpha) = 0.63 \cdot n_{\text{ph}}(0) \quad (7)$$

であり, 割合としては

$$\frac{n_{\text{ph}}(0) - n_{\text{ph}}(1/\alpha)}{n_{\text{ph}}(0)} = 0.63 = 0.63 \times 100\% \quad (8)$$

$$= 63\% \quad (9)$$

である.

- (v) (a) ここでは簡単のために, 空乏層の端から拡散距離だけ離れた範囲の中に生成された過剰少数キャリアは全て空乏層まで達し, 電流に寄与すると考える. (厳密に計算する場合はこんなに大雑把にするとダメだが, 電子と正孔のどちらがより多く電流に寄与しているか, ということを考える程度であれば問題ないはず.)

n 型層の正孔の拡散距離  $L_p$  は, n 型層の厚さ  $0.30 \times 10^{-6} \text{ m}$  よりも大きいので, n 型層 (空乏層を除く) で光子が吸収されて生成された正孔は全て電流に寄与すると考える. なお, 空乏層で生成された電子正孔対は, p 型層でも n 型層でも関係なく電子も正孔も電流に寄与するのでここでは考えない.

光の波長が  $\lambda_2$  の場合は,  $\alpha(\lambda_2) = 10^7 \text{ m}^{-1}$  である. つまり  $1/\alpha(\lambda_2) = 10^{-7} \text{ m}$  である. 問題 (iv) で考えたように, 入射した光子のうち 63% が  $1/\alpha$  に到達するまでに吸収される.  $1/\alpha(\lambda_2) = 10^{-7} \text{ m}$  は n 型層の途中に位置しており, 空乏層に達するまでに, 入射した光子の過半数が n 型層で吸収されることがわかる. よって波長が  $\lambda_2$  の場合は明らかに電子よりも正孔の方がより多く光電流に寄与する.

光の波長が  $\lambda_1$  の場合は,  $\alpha(\lambda_1) = 10^6 \text{ m}^{-1}$  である. つまり  $1/\alpha(\lambda_2) = 10^{-6} \text{ m}$  である. この位置 ( $x = 10^{-6} \text{ m}$ ) は, pn 界面の深さよりも 3 倍ほど深い位置で, p 型層に位置している. 明らかではないが, おそらく n 型層で吸収される光子数よりも p 型層で吸収される光子数の方が多いと考えられる. 実際に計算してみると, n 型層の空乏層以外で吸収される光子数は 2 割程度なのに対して, p 型層の空乏層の端 ( $x = x_p$ ) から拡散距離だけ離れた位置 ( $x = x_p + L_n$ ) までの間で吸収される光子数は 7 割程度である. よって, 波長が  $\lambda_1$  の場合は電子の方がより多く光電流に寄与する. (しかし指数関数の計算って関数電卓がないとできないよね …? 実際の試験のときはどうやって計算するんだろう.)

- 波長が  $\lambda_1$  の場合は電子の方がより多く光電流に寄与する
- 波長が  $\lambda_2$  の場合は正孔の方がより多く光電流に寄与する

- (b) 半導体表面近傍の欠陥により再結合が促されるため, n 型層の過剰少数キャリアである正孔による光電流は, 欠陥がない場合と比べて小さくなる.

波長  $\lambda_1$  の場合は p 型層の過剰少数キャリアである電子がより多く電流に寄与しているため, n 型層表面近傍の欠陥による再結合はあまり影響がない. もちろん全然影響がないわけではなく, 光電流は少し小さくなると考えられる.

一方, 波長  $\lambda_2$  の場合は, n 型層の過剰少数キャリアである正孔がより多く電流に寄与しているため, n 型層表面近傍の欠陥による再結合は影響が大きい. 波長  $\lambda_1$  の場合と比べて, 光電流の減少はより大きくなると考えられる.

(この問題の意図がよくわからないんですが, 問題 (v)(a) からの流れを考えるとこういう答えでいいんですよね … 多分.)

- (vi) 間接遷移型半導体の場合, 電子正孔対の生成や再結合には運動量の変化が伴う. つまり, フォノンの介在が必要である. それに対して直接遷移型半導体の場合は運動量の変化は伴わず, フォノンの介在は必要ない. 間接遷移と直接遷移の遷移のしやすさを比べると, フォノンの介在が不必要な直接遷移の方が遷移しやすい. つまり, 遷移確率が高い.

拡散距離というのは, 拡散しやすいほど大きくなる. 再結合しにくいほど拡散しやすいといえるので, 直接遷移型半導体と間接遷移型半導体を比べると, 間接遷移型半導体のほうが拡散距離が大きい値になる.