



電気・電子計測

【第10回】センサによる計測技術1
5章センサによる物理量の計測(1)

<http://cobayasi.com/keisoku/10th/10th.pdf>



授業スケジュール

＜第1回(4/12)＞ガイダンス、電気・電子計測の学び方

＜第2回(4/19)＞計測の基礎

＜第3回(4/26)＞電気計測・直流1

＜第4回(5/10)＞電気計測・直流2

＜第5回(5/17)＞電気計測・交流1

＜第6回(5/24)＞電気計測・交流2

＜第7回(5/31)＞センサの基礎1

＜第8回(6/7)＞センサの基礎2

＜第9回(6/14)＞中間試験

＜第10回(6/21)＞センサによる計測技術1

＜第11回(6/28)＞センサによる計測技術2

＜第12回(7/5)＞アナログ・デジタル変換(計測値の変換)

＜第13回(7/12)＞デジタル計測制御システムの基礎

＜第14回(7/19)＞電子計測器

＜第15回＞定期試験(定期試験期間で実施)

今日の学習の要点

(テキストP54～P64)

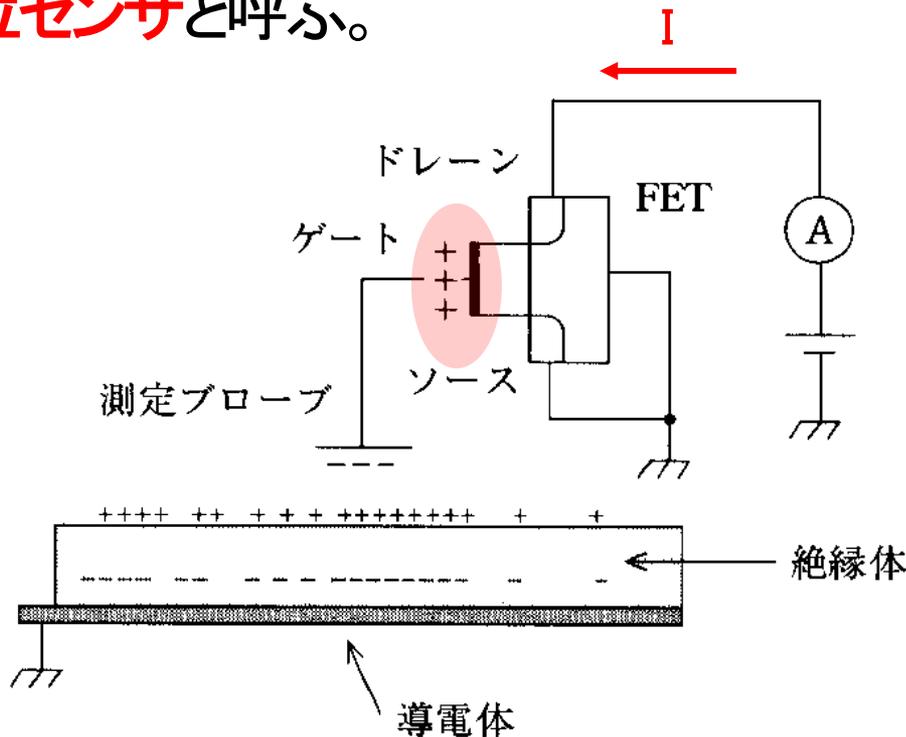
本日の授業では、電界, 磁界, 光, 温度などを検出する**センサの動作原理**や**使用方法**について学ぶ。また、近年よく使用されている**半導体センサの基本動作**とこのセンサと共に使用する**信号処理回路の設計の基礎**についても学ぶ。

1. 電界を計測しよう
2. 磁界を計測しよう
3. さまざまな光計測について知ろう
4. 温度を計測しよう

1. 電界を計測しよう テキストP54-55

(1) 高入力インピーダンスFET(Field effect transistor:電界効果トランジスタ)

電荷を帯びた導体(帯電体)の周辺には、帯電量に比例した強さの電界が存在する。この電界を測定することができる、電界センサを**表面電位センサ**と呼ぶ。



絶縁体表面に存在する電荷により発生した電界が、測定プローブに電荷を発生させて、FETのゲートに影響を与える。

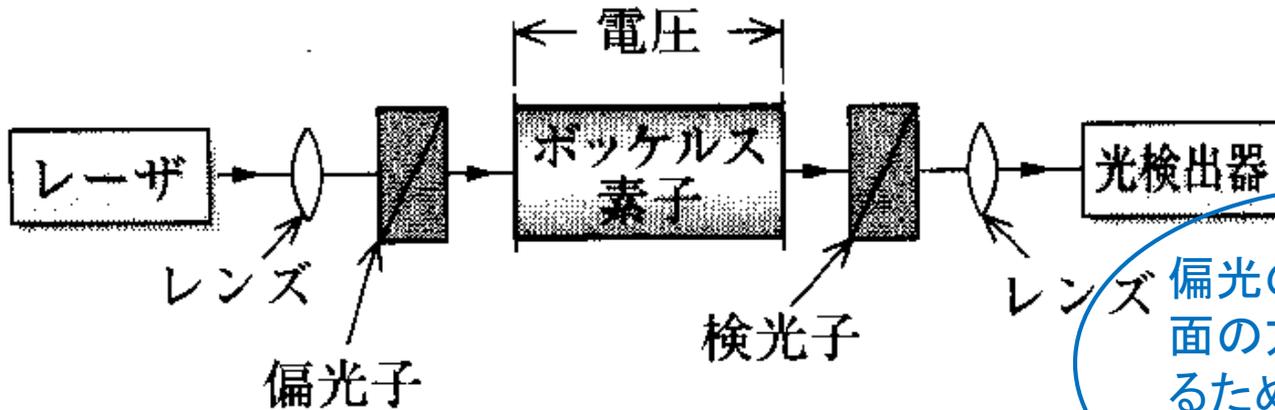
この影響により、発生した電界に比例して、FETのソース・ドレイン間に電流 I を流す。

図5.1 FETによる電荷分布測定(教科書P54)

(2) 光電界センサ

光によって、電気的性質
が変化する物質

電気光学物質(ニオブ酸リチウムなど)に、電界を当てると(光の)屈折率が変化する。屈折率が、電界の1乗に比例するのをポッケルス(Pockels)効果と呼び、電界の2乗に比例するのをカー効果(Kerr)効果と呼ぶ。



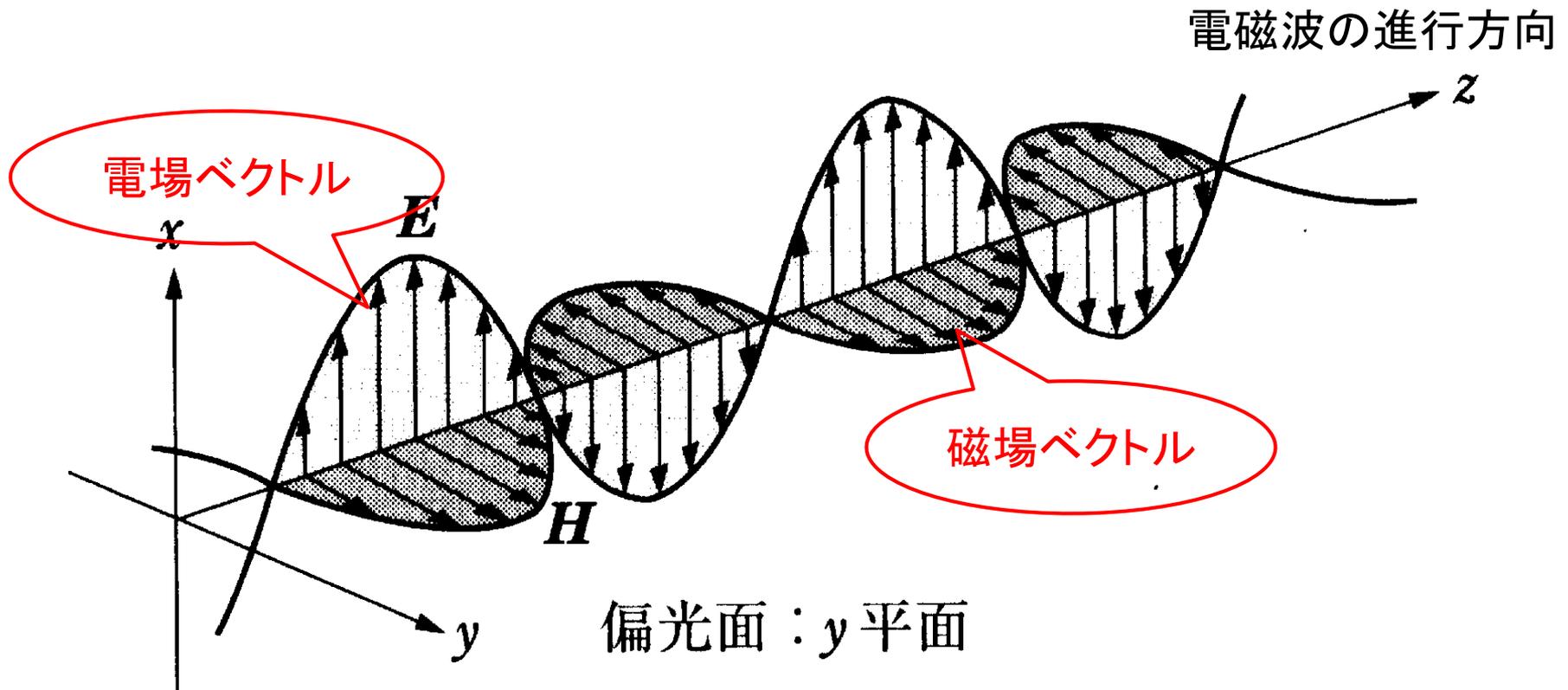
偏光の有無や偏光面の方向を検出するための素子(偏光プリズムなど)

図5.2 光電界センサ(教科書P55)

ポッケルス素子に電界を当てると、屈折率が変化してレーザー光の偏光面が変化する。この偏光面の変化を、検光子で検出することによって電界を計測できる。

【補足説明】光と偏光面

光は、電磁波(通称:電波)と同じように、電場(電界の及ぶ範囲)と磁場(磁界の及ぶ範囲)が、進行方向(Z)に対して互いに垂直な平面になっている



<教科書P55> 電磁波の電界ベクトル(E)と磁界ベクトル(H)

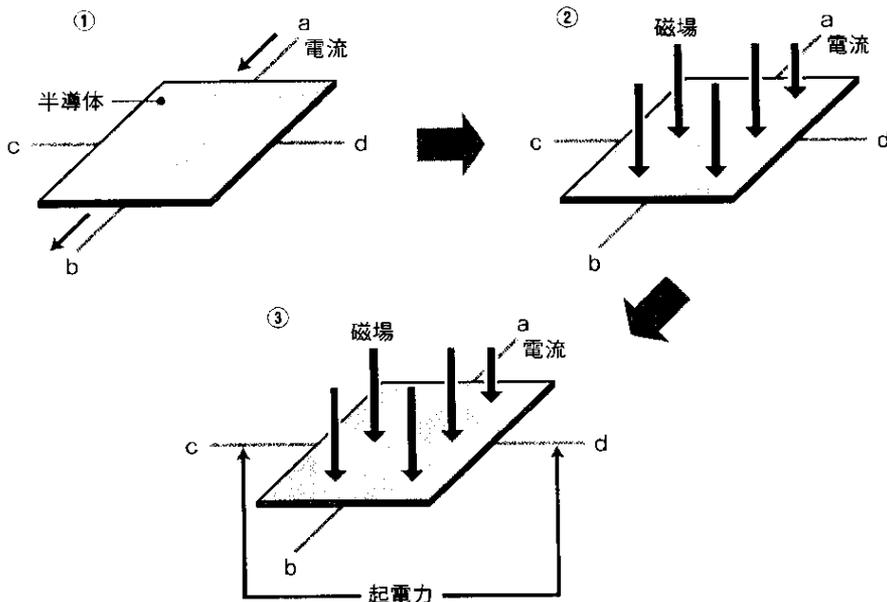
2. 磁界を測定しよう

テキストP56-58

(1) ホール素子

ホール効果は、1879年に米国の物理学者エドウィン・ホール(Edwin Hall)によって発見された現象。ホール効果を使ったホール素子は、精密モータの制御に多用されている。

電流が流れている物体(通常は半導体)に、電流に対して磁界を垂直にかけると、半導体内のキャリア(荷電子)がローレンツ力により、**電流と磁界の両方に直交する方向に起電力が生じる現象**



- ① a-b間に電圧をかけて電流 I_H を流す
 - ② 電流 I_H に対して垂直に磁界 B をかける
 - ③ ホール効果によってc-d間に起電力 V_H が発生する
- 電流 I_H を一定にしておくと、磁界 B に比例した起電力 V_H が測定できる

$$V_H = \frac{K_H}{d} I_H B \quad (5.1)$$

K_H : ホール係数 d : ホール素子の幅

ホールIC

ホール素子から出力される微弱な信号を、増幅回路で増幅する

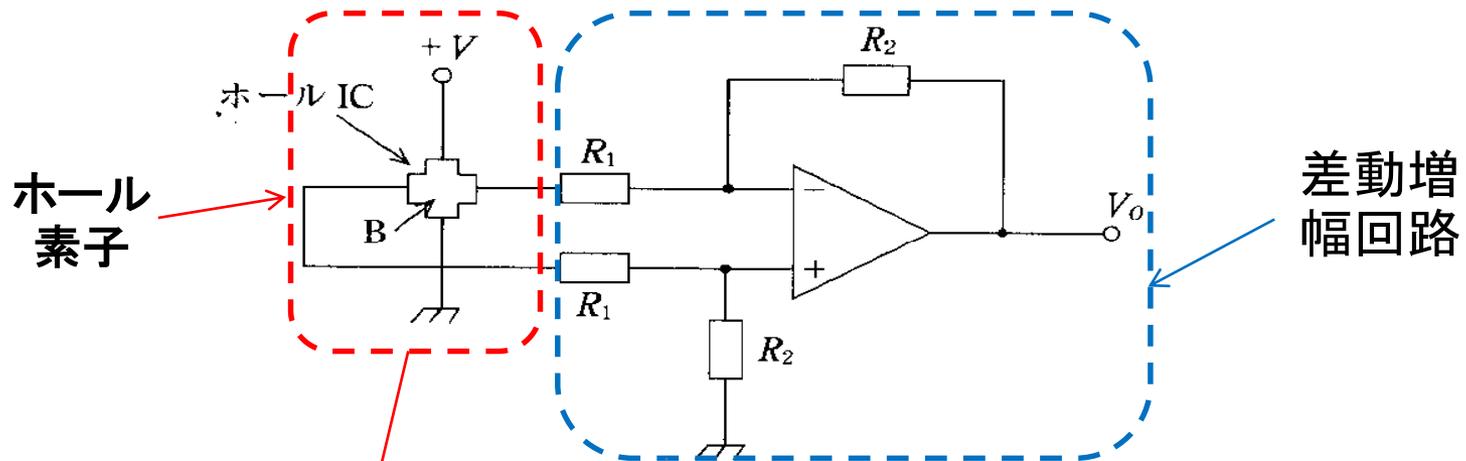
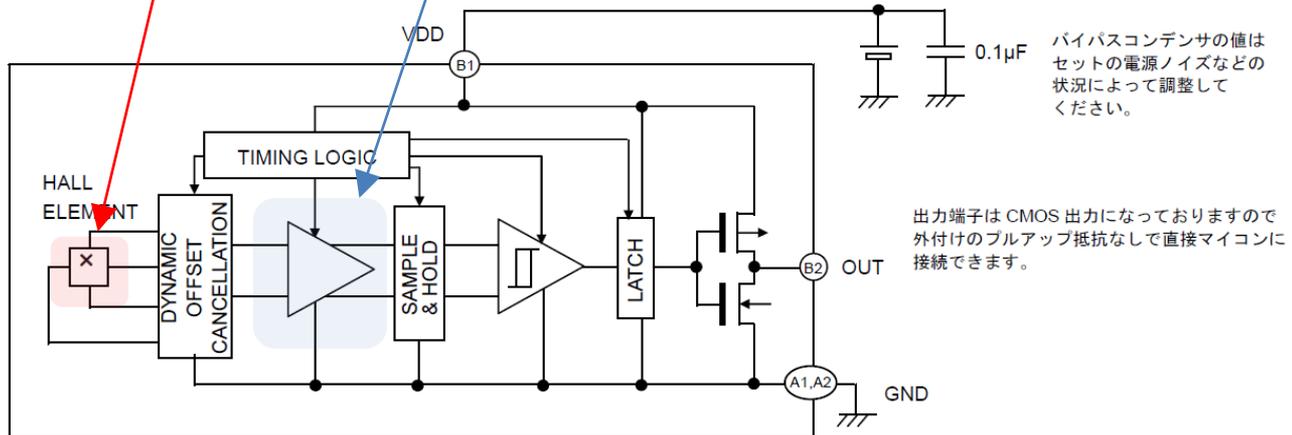


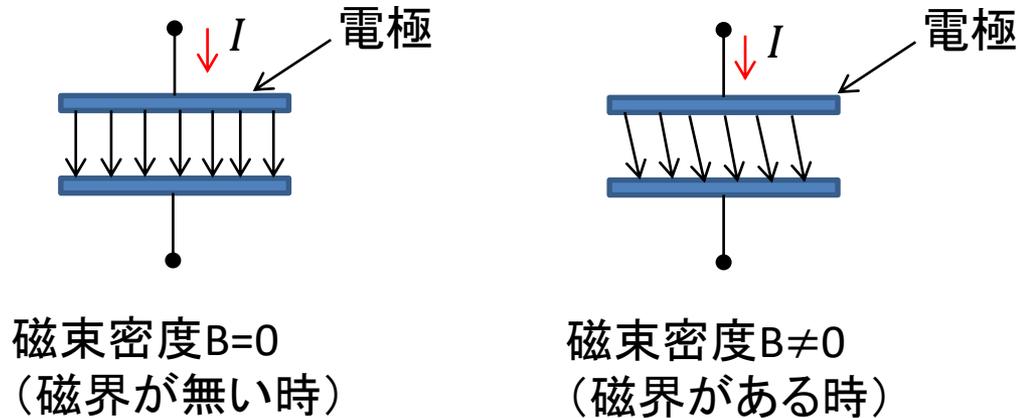
図5・4 ホールICを利用した磁界検出回路(教科書P57)



ローム社のホールIC(BU52054GWZ)の概観、ブロック図

(2) 磁気抵抗素子

磁界によって導体の電気抵抗が変化する現象(磁気抵抗効果: Magneto Resistance effect)を利用して、測定磁界の強さを計測できる

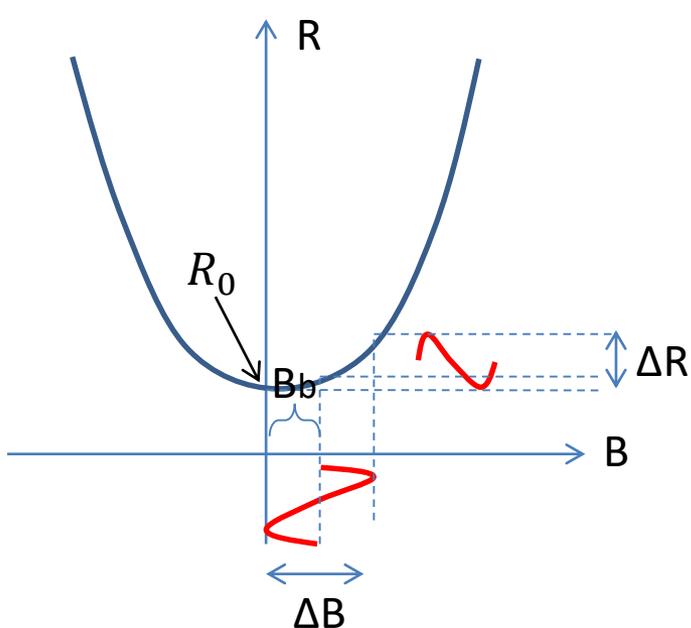


磁界を加えると、電流 I はローレンツ力により経路が長くなり、抵抗が増加する

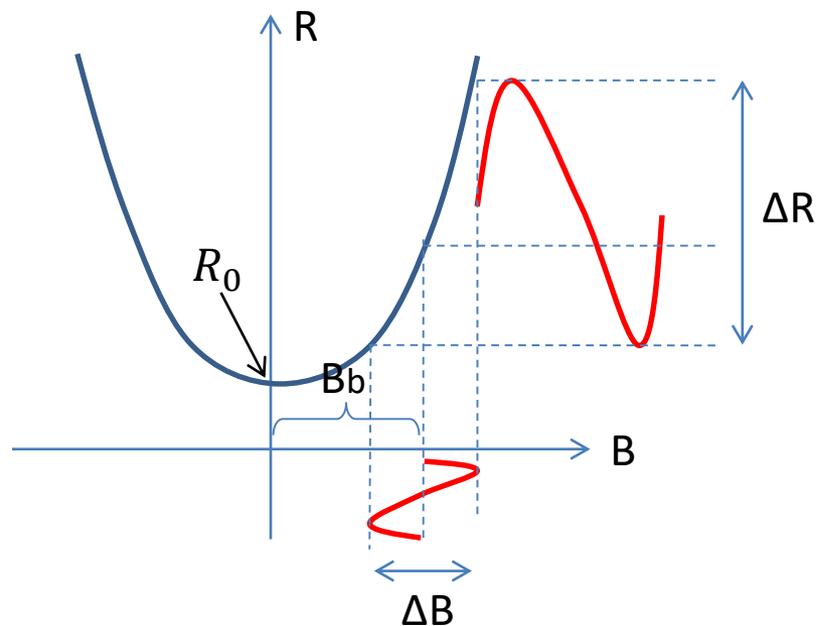
$$R = R_0(1 + \alpha B^2) \quad (5 \cdot 3)$$

R_0 : 磁界が無い時の抵抗 α : 感度の係数

抵抗変化 R は、式(5・3)に示すように磁界の2乗に比例する



磁界バイアス B_b が小さい場合



磁界バイアス B_b が大きい場合

図5.5 磁気抵抗効果センサの磁界検出特性(教科書P58)

磁界バイアス B_b が極めて小さい場合は、磁界の感度が低いので、磁界の検出も困難になる。このため、磁界バイアス B_b を大きくすることで、磁界の感度を高め、磁界の検出を安易にできる。

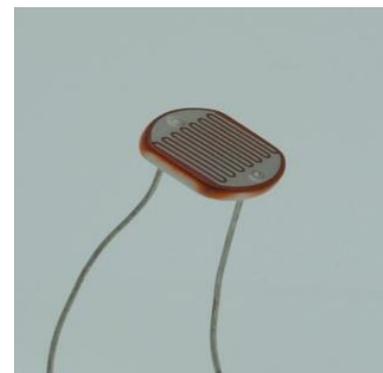
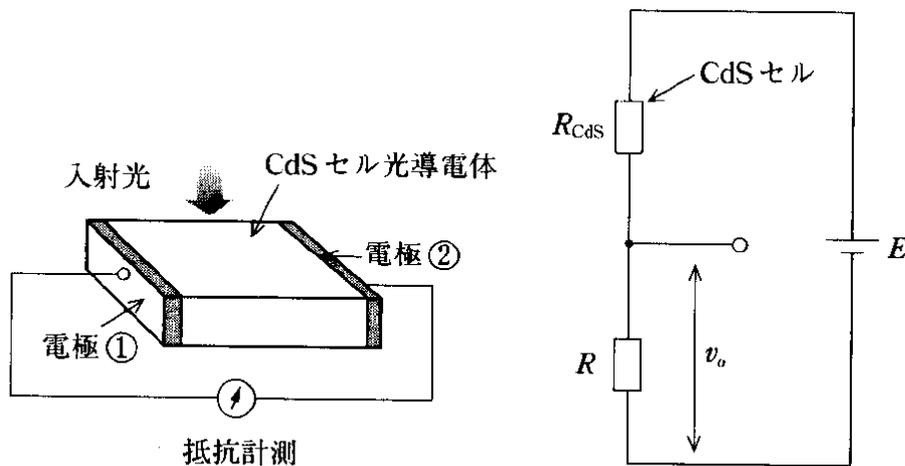
3. さまざまな光計測について知ろう

(1) 光導電セル

テキストP58-61

光によって内部抵抗が変化する現象(光導電効果)を利用して、光量に比例した電流を流すことができる

CdS(硫化カドミウム: Cadmium Sulfide)またはCdSe(セレン化カドミウム: Cadmium Selenium)は、波長が約400-680[nm]の可視光線を、PbSやPbSeは、波長が約780[nm]-1[mm]の赤外線を対象とする

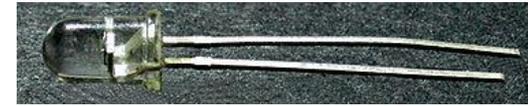


$$v_0 = \left(\frac{R}{R_{CdS} + R} \right) E \quad (5.5)$$

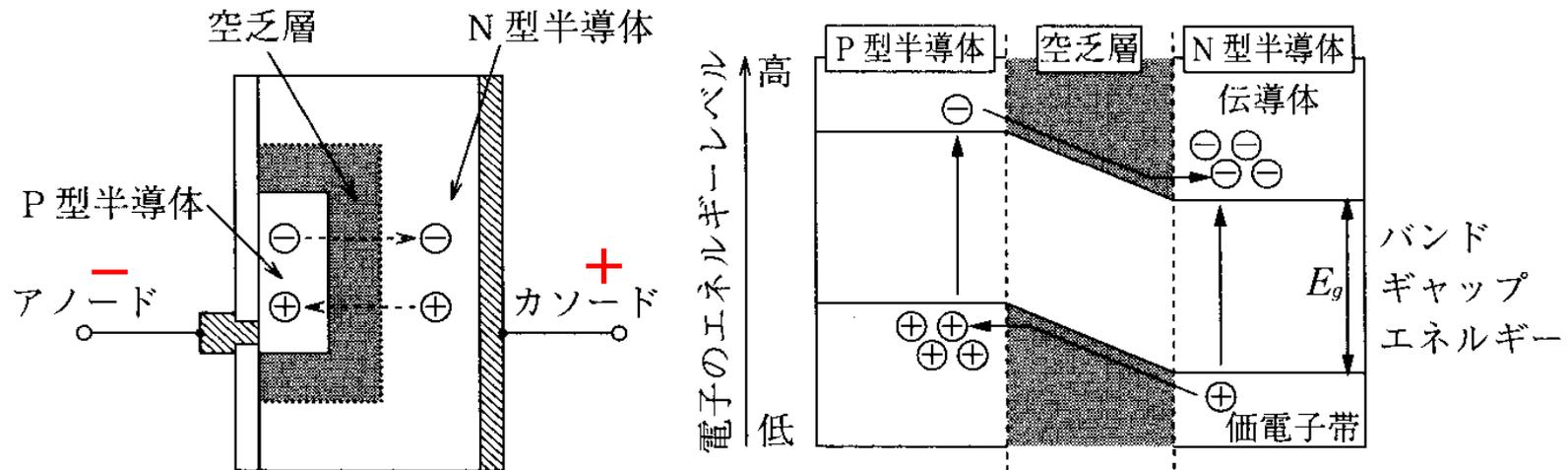
(a) CdSセルの光検出動作 (b) CdSセルを利用した光計測用分圧回路

図5.6 CdSセルによる光計測(教科書P59)

(2) フォトダイオード(光起電力素子・その1)



光を当てると起電力を発生する現象(光起電力効果)を利用して、照射した光量に比例した電流を流すことができる

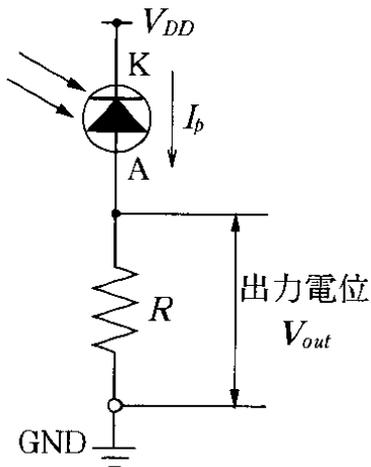


P型半導体側の端子(A:アノード)に負(-)電圧、N型半導体側の端子(K:カソード)に正電圧(+)を印加すると、2つの層の間にキャリアがほとんどない層(空乏層)が現れる

空乏層によって、P型層内の電子はN型層へ、N型層の正孔はP型層へ加速されて集められる。これにより、P型層ではプラスに、N型層ではマイナスに帯電し、起電力が発生する。

【フォトダイオードの測定回路】

光によって流れる電流

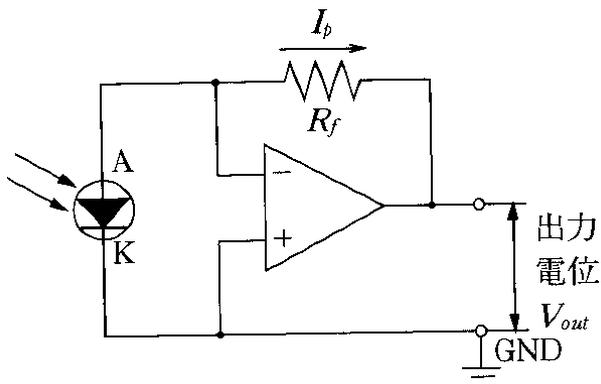


光電流 I_p を抵抗 R に流すことにより、 R の両端に出力電位 V_{out} を発生する

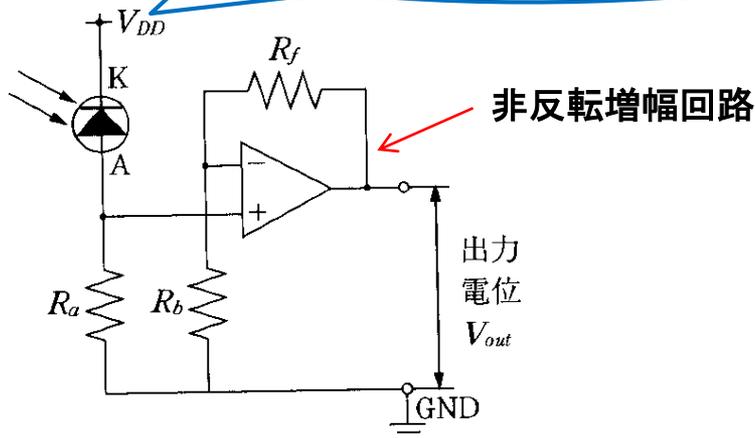
$$V_{out} = I_p R$$

<基本測定回路>

バイアス電圧: 電子回路を正しく動作させるための電圧



<バイアス電圧を与えない回路>

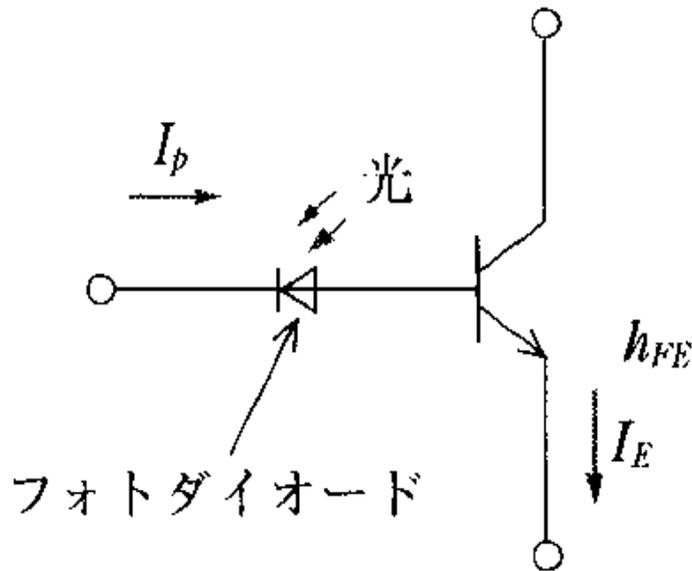


<バイアス電圧を与えた回路>

$$V_{out} = -I_p R_f$$

(3) フォトトランジスタ(光起電力素子・その2)

フォトダイオードと同様に**光起電力効果**を利用して、照射した光量に比例した電流を流すことができる。フォトダイオードよりも出力電流は大きいですが、応答時間は遅い。



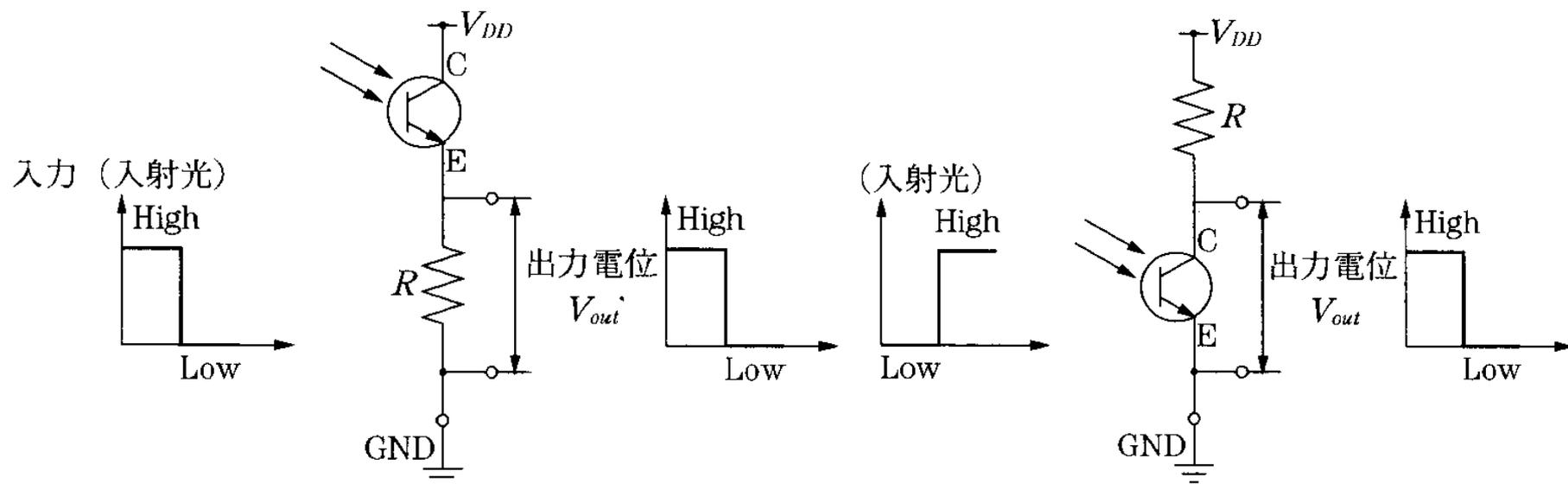
エミッタ電流は

$$I_E = (1 + h_{FE})I_p \cong I_p h_{FE}$$

電流増幅度 $h_{FE} \gg 1$ のとき

図 5・8 フォトトランジスタの等価回路 (教科書P60)

【フォトランジスタの測定回路】



(a)エミッタ出力回路

出力電位が入射光と**同位相**

(b)コレクタ出力回路

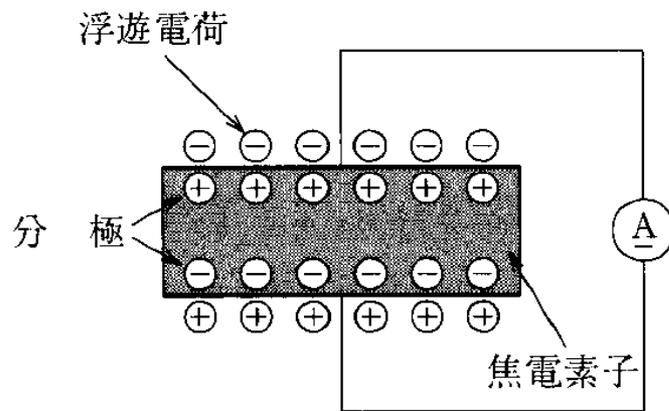
出力電位が入射光と**逆位相**

図5・9 フォトランジスタによる光計測基本回路(教科書P61)

(4) 焦電形赤外線センサ(Pyroelectric infrared sensor)

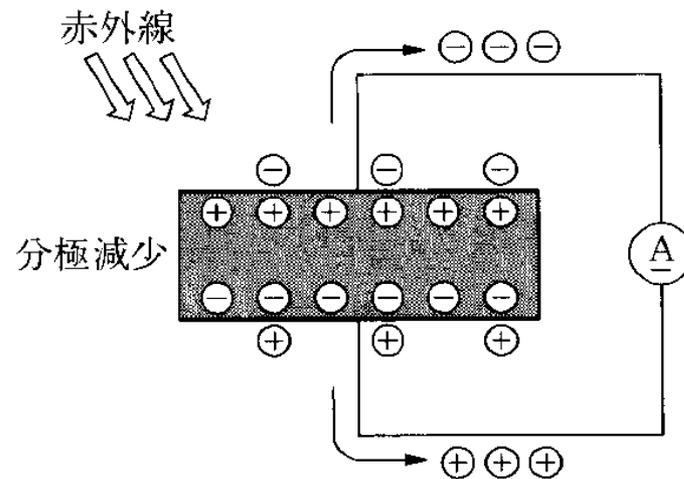


温度変化によって誘電体(PZT:チタン酸ジルコン酸鉛など)の分極(表面電荷)が変化する現象(焦電効果:Pyroelectric effect)を利用して、赤外線の変化や温度の変化に応じた電流を流すことができる



(a) 定常状態

定常状態では、誘電体の分極(電気的な偏り)が生じた状態となり、大気中の浮遊電荷が吸着して、電荷の偏りは起こらない。



(b) 温度変化後

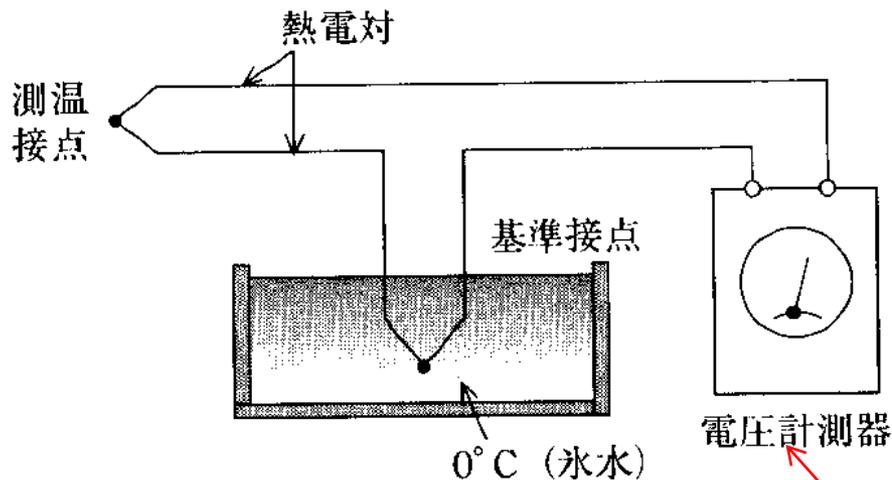
赤外線が照射されると、熱エネルギーによる焦電素子の温度上昇によって、分極が減少し、表面の電荷のみが減る。これによって、電荷が発生する。

4. 温度を計測しよう

テキストP61-63

(1) 熱電対(Thermocouple)

異種類の金属または半導体の接合部分に温度差を設けることで、起電力が発生する現象(ゼーベック効果)を利用して、温度変化に応じた電流を流すことができる。



一方の端(測温接点)を被測定物に接触させ、もう一方の端(基準接点)を一定の温度に保つ必要がある

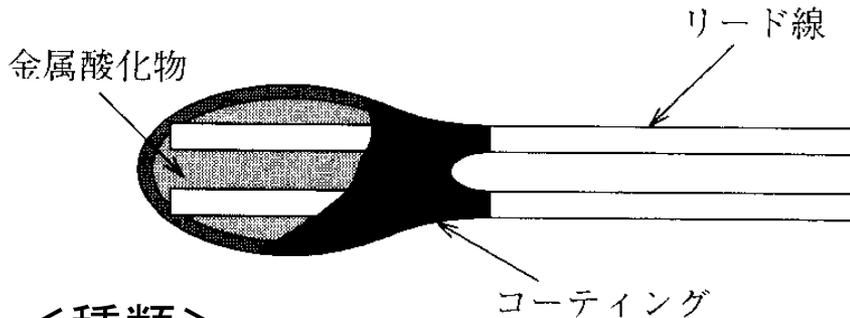
温度差に応じた(微弱)電流を、測定可能な電圧に変換して、電圧計測器で測定する

図5・10 熱電対による温度の計測
(教科書P62)

高精度(オフセットやドリフトが小さい)のオペアンプや計装用差動アンプを使用する

(2)サーミスタ

温度変化による金属酸化物や半導体などの電気抵抗の変化を利用したもの



温度変化によって金属酸化物内部の電子及び正孔の数が変化して、リード線間の抵抗値が変化する

<種類>

- NTC(negative temperature coefficient)

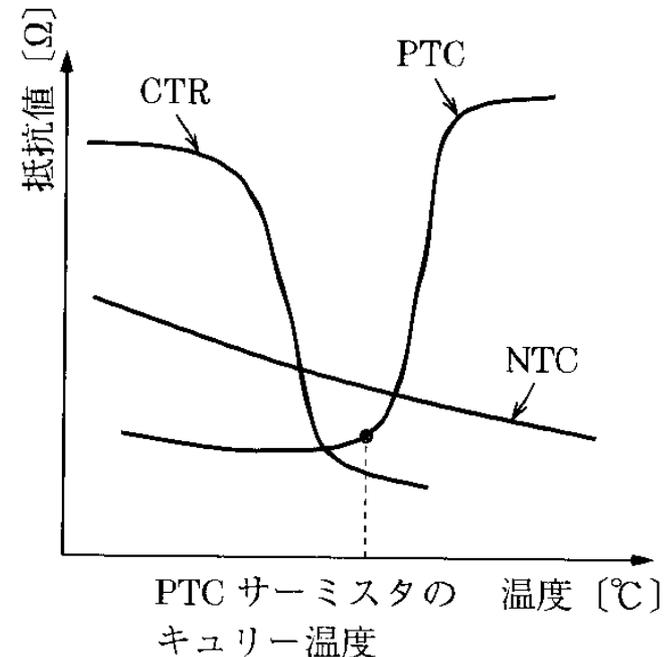
温度上昇に対して、抵抗値が減少し、測定範囲が広い(エアコンや冷蔵庫などの温度センサ)

- PTC(positive temperature coefficient)

温度上昇に対して、抵抗値が急激に上昇する(ヒータなどの加熱防止装置)

- CTR(critical temperature coefficient)

温度上昇に対して、抵抗値が急激に下降する(温度警報用など)



(3) IC温度センサ

温度変化に応じて、トランジスタのベース・エミッタ間の電圧 V_{be} が変化することを利用して、温度変化に応じた出力電圧を得る

一般には、異なったコレクタ電流を流した2つのトランジスタの V_{be} の差 $\Delta V_{be} = (V_{be1} - V_{be2})$ を、出力電圧として取り出す回路が多い

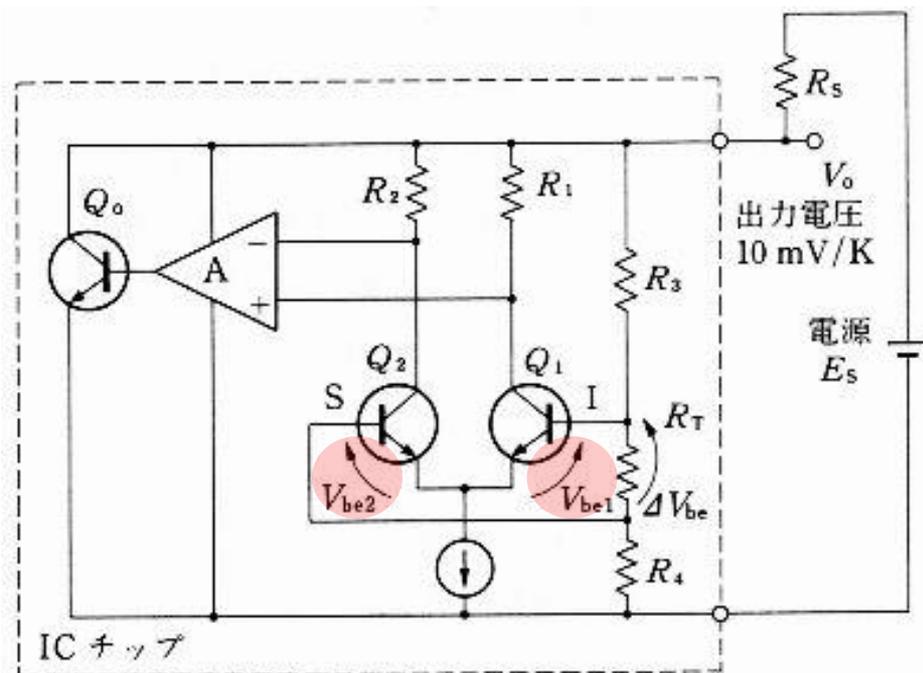
下の回路において、2つのトランジスタのベース・エミッタ間の電流の差は、

$$\Delta V_{be} = V_{be1} - V_{be2} = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{I_{c1}}{I_{c2}}\right)$$

※トランジスタ Q_1 のコレクタ電流: I_{c1} 、トランジスタ Q_2 のコレクタ電流: I_{c2} 、ボルツマン係数: k 、電子の電荷量: q 、絶対温度: T

出力電圧 V_0 は、

$$V_0 = \left(\frac{R_3 + R_T + R_4}{R_T}\right) \Delta V_{be}$$



【問題1】

光電界センサで利用される物理現象で、光の屈折率が、電界の2乗に比例することを何と呼ぶか？ 次のa.～c.より選べ

a. ポツケルス効果

b. カー効果

c. ホール効果

【問題2】

帯電体周辺の帯電量に比例した強さの電界を、測定プローブに誘起した電荷の強さで計測するセンサを何と呼ぶか？ 次のa.～c.より選べ

- a. 表面電位センサ
- b. 電界誘起センサ
- c. 電界効果センサ

【問題3】

表面電位センサで利用される高入力インピーダンスのトランジスタを何と呼ぶか？ 次のa.～c.より選べ

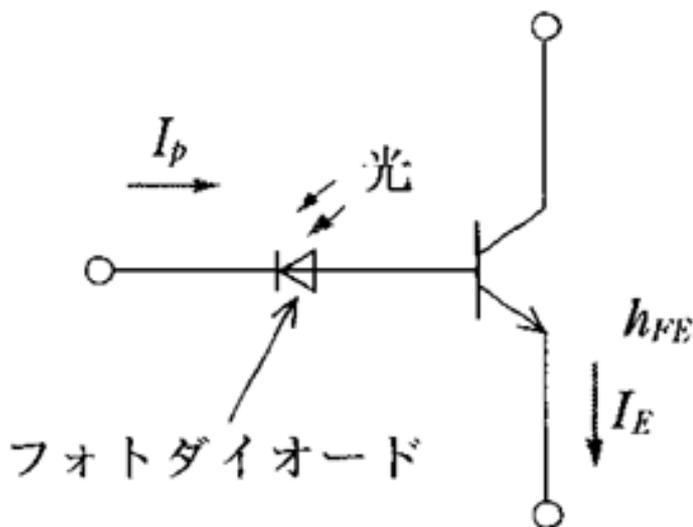
a. PNPトランジスタ(PNP Transistor)

b. バイポーラトランジスタ(Bipolar Transistor)

c. 電界効果トランジスタ(FET : Field Effect Transistor)

【問題4】

次に示すフォトトランジスタで、光電流(フォトダイオードに流れ込む電流) $I_p = 100[\mu A]$ であった。電流増幅率 $h_{FE} = 1000$ のトランジスタでは、エミッタ電流 I_E はいくつになるか？求めよ。



【ヒント】 $I_E = (1 + h_{FE})I_p \cong I_p h_{FE}$ より

$$\begin{aligned} I_E &\cong I_p h_{FE} \\ &= 100 \times 10^{-6} \times 1000 \\ &= 100 \times 10^{-3} = 100[mA] \end{aligned}$$

【問題5】

「測定温度範囲内で、温度が上昇するのに対して、抵抗値が減少する。温度変化に対して抵抗値の急激な変化はない。」

このような特性のサーミスタを、a.～c.から選べ

a. PTC

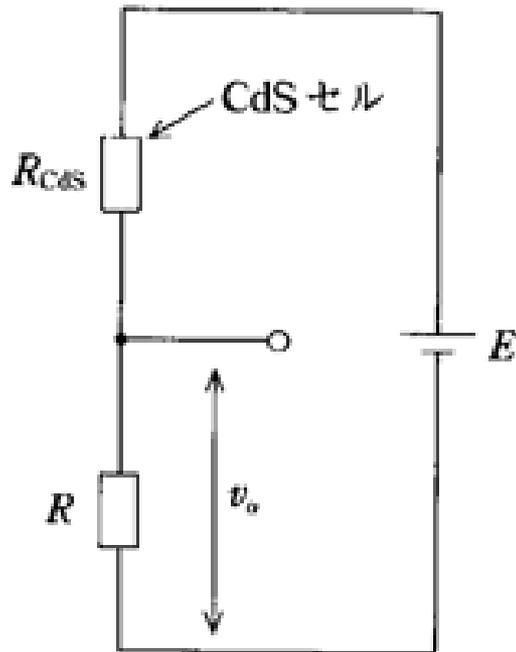
b. CTR

c. NTC

【問題6】

本日の提出課題

次に示すCdS(Cadmium Sulfide)を使った光計測回路で、印加電圧 $E=10[V]$ 、CdSの抵抗値 $R_{CdS} = 10[\Omega]$ 、負荷抵抗値 $R=10[\Omega]$ のとき、負荷抵抗 R の両端に現れる出力電圧 $v_0[V]$ を求めよ。



$$\text{式(5.5)} \quad v_0 = \left(\frac{R}{R_{CdS} + R} \right) E \text{より}$$

$$v_0 = \left(\frac{10}{10 + 10} \right) \times 10 = 5[V]$$