

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)

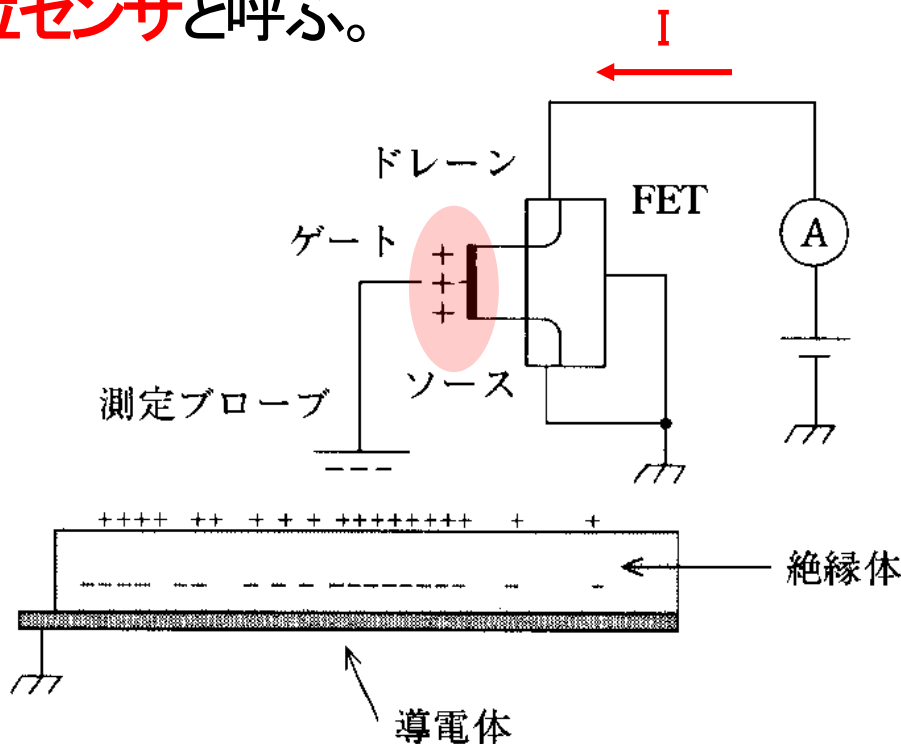
本日の授業では、電界, 磁界, 光, 温度などを検出する**センサの動作原理や使用方法**について学ぶ。また、近年よく使用されている**半導体センサの基本動作**とこのセンサと共に使用する**信号処理回路の設計の基礎**についても学ぶ。

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。

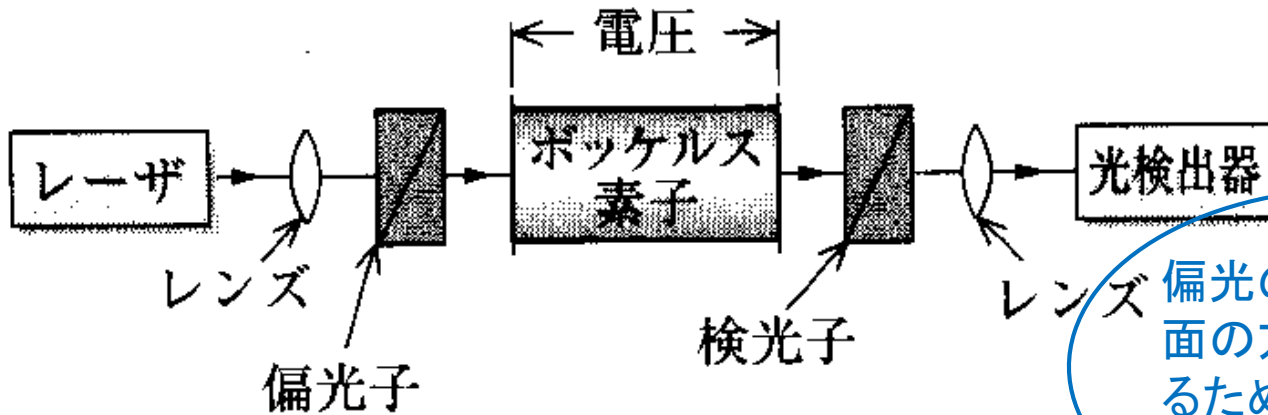
この影響により、発生した電界に比例して、FETのソース・ドレイン間に電流 I を流す。

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。



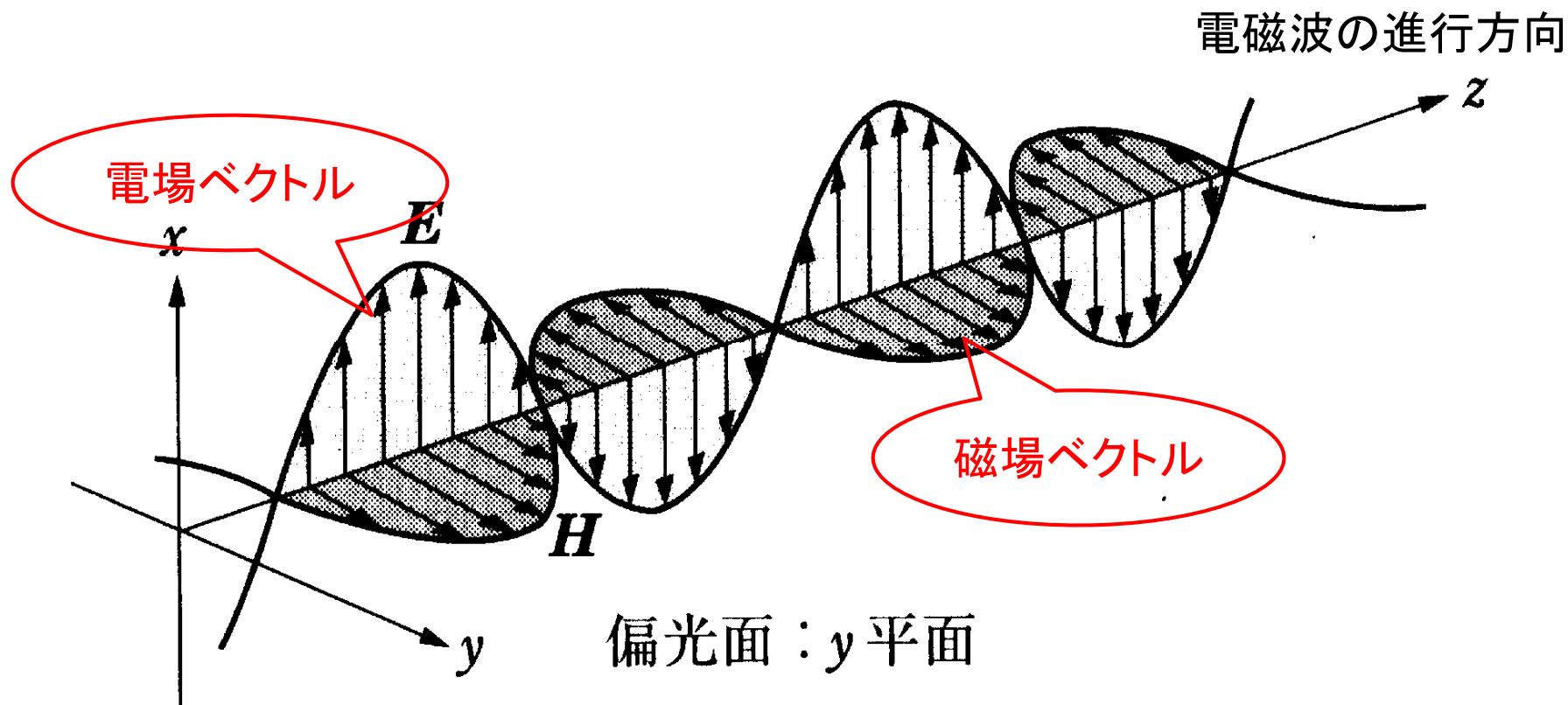
偏光の有無や偏光面の方向を検出するための素子(偏光プリズムなど)

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 ）に対してお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)

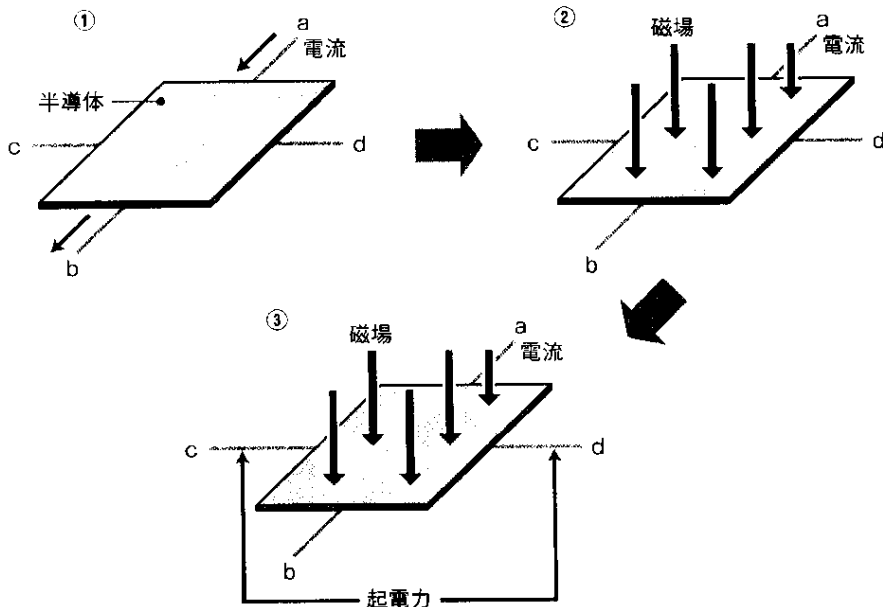
2. 磁界を測定しよう

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

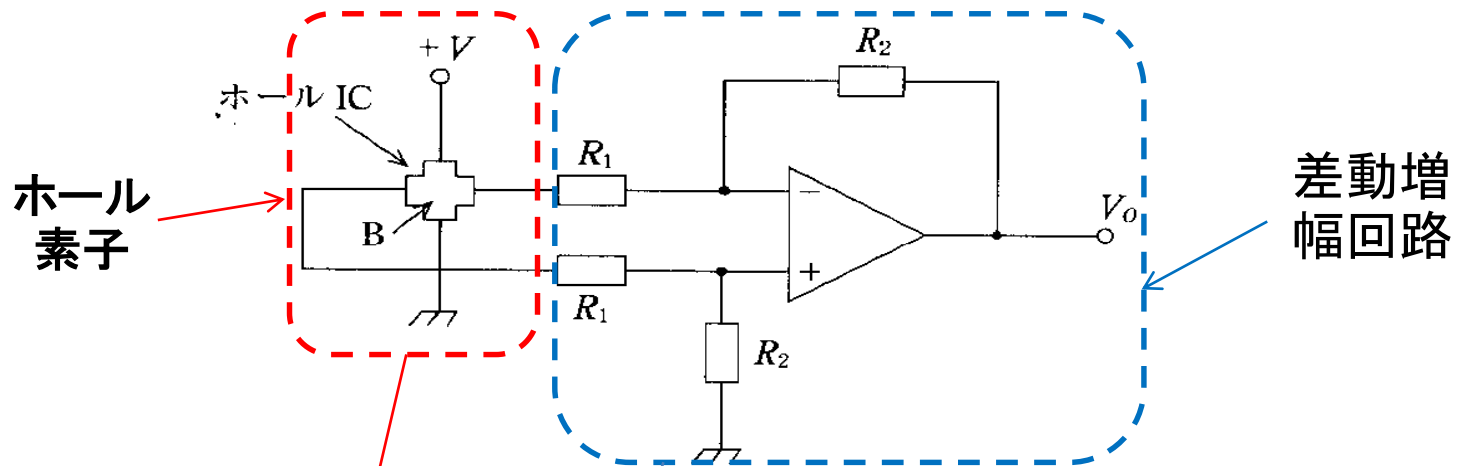
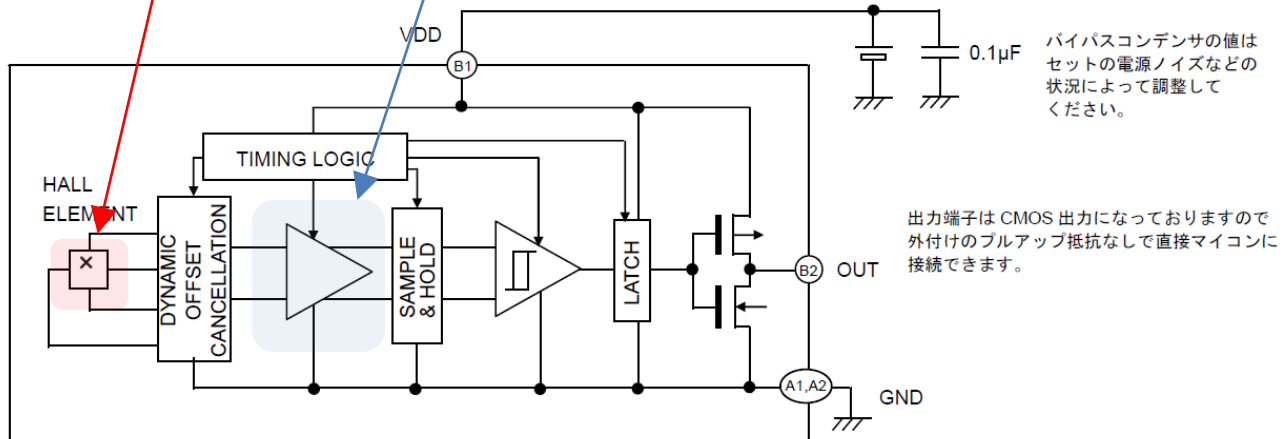


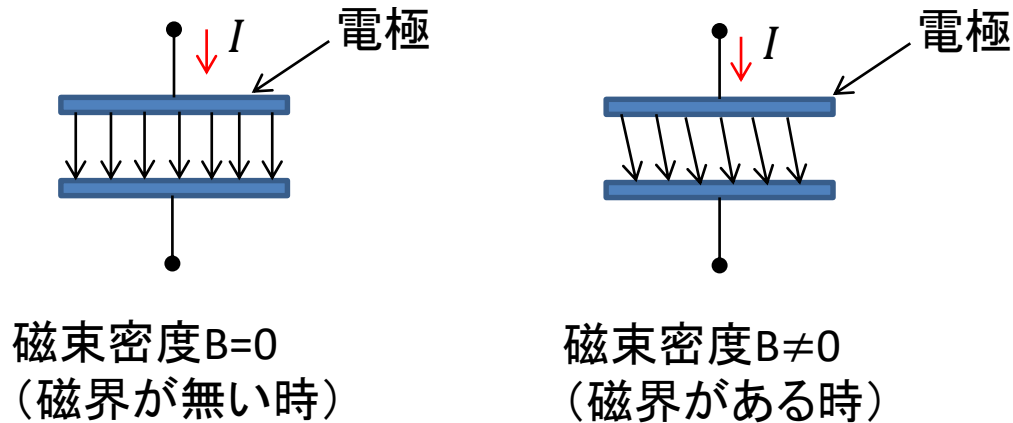
図5・4 ホールICを利用した磁界検出回路(教科書P57)



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

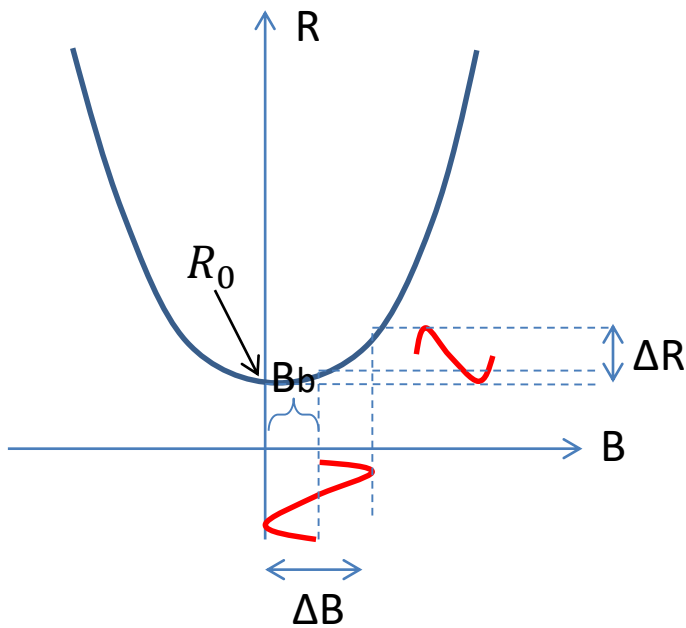


磁界を加えると、電流 I はローレンツ力により経路が長くなり、抵抗が増加する

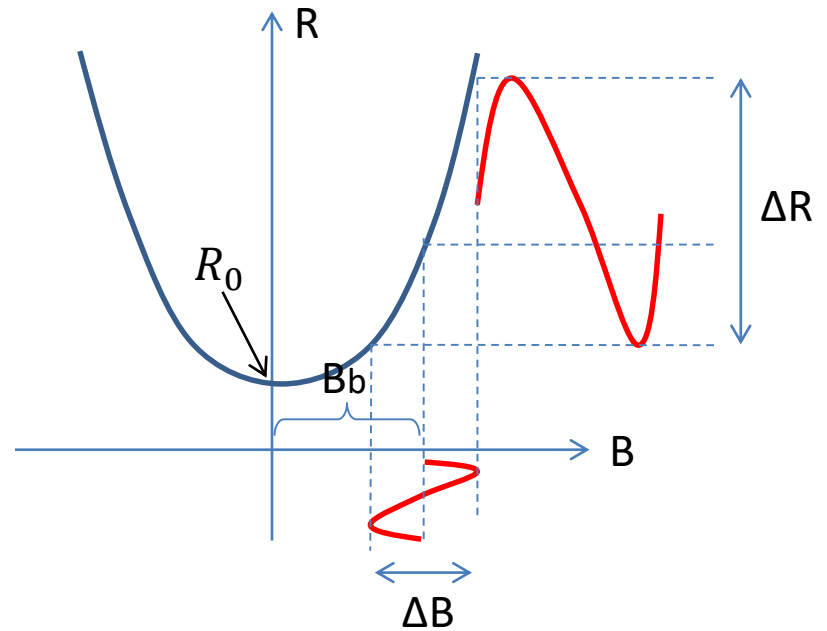
$$R = R_0(1 + \alpha B^2) \quad (5 \cdot 3)$$

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。

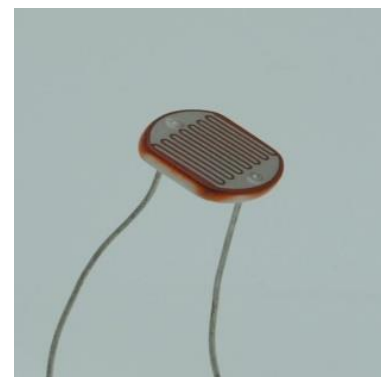
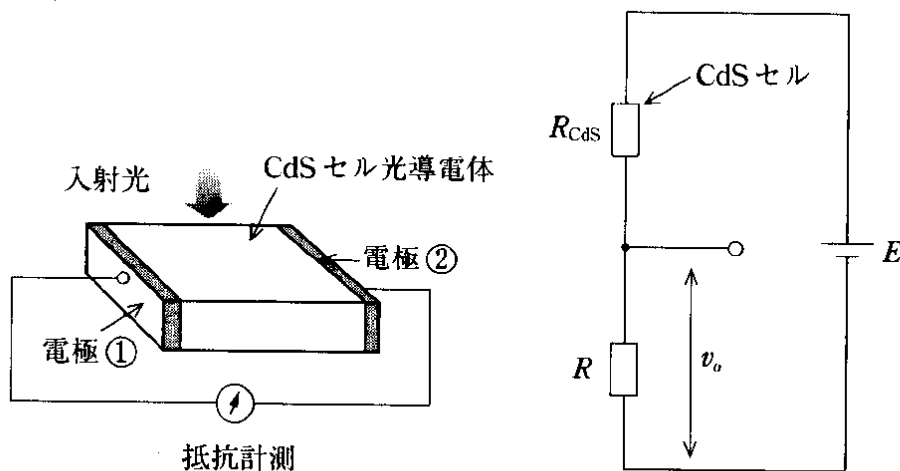
3. さまざまな光計測について知ろう

(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



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

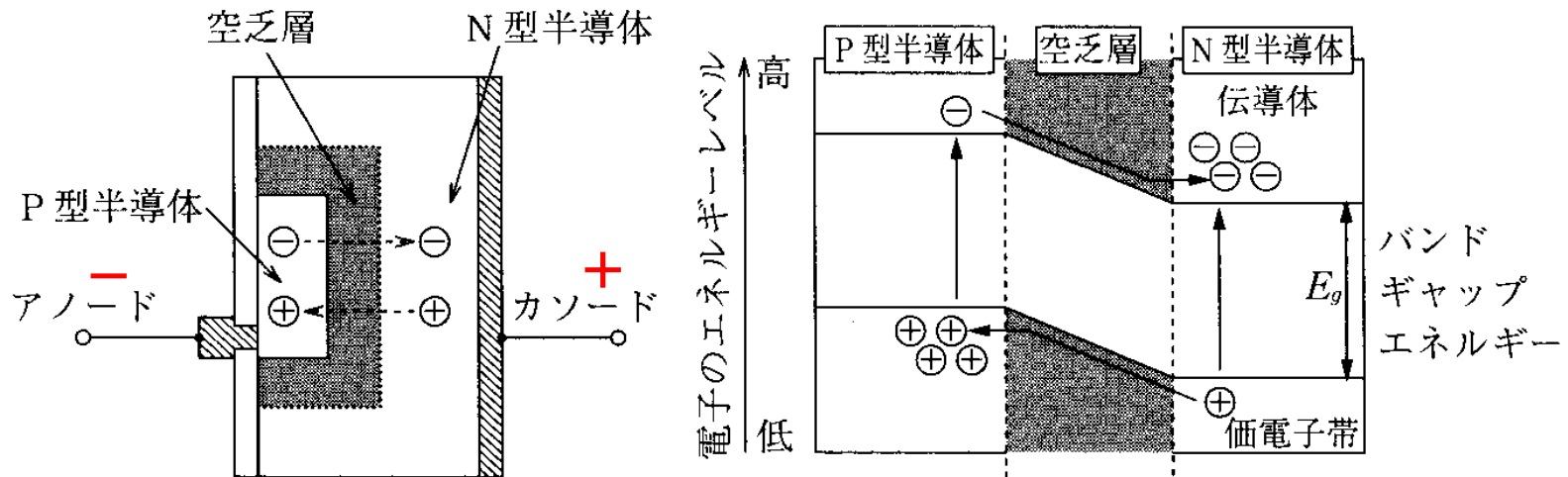
(a) CdSセルの光検出動作 (b) CdSセルを利用した光計測用分圧回路

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

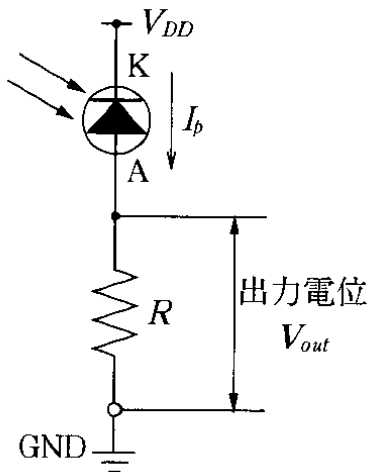


P型半導体側の端子(A:アノード)に負(-)電圧、N型半導体側の端子(K:カソード)に正電圧(+)を印加すると、2つの層の間にキャリアがほとんどない層(空乏層)が現れる

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

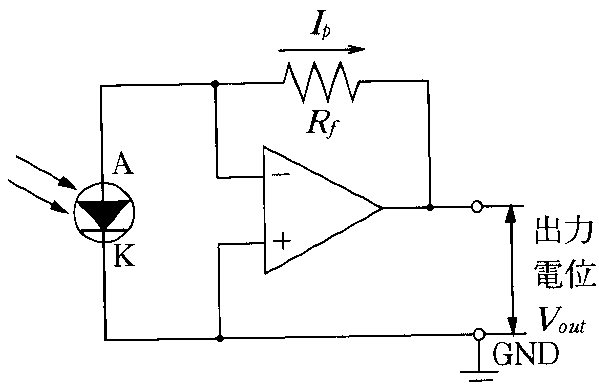


光電流 I_p を抵抗 R に流すことにより、 R の両端に出力電位 V_{out} を発生する

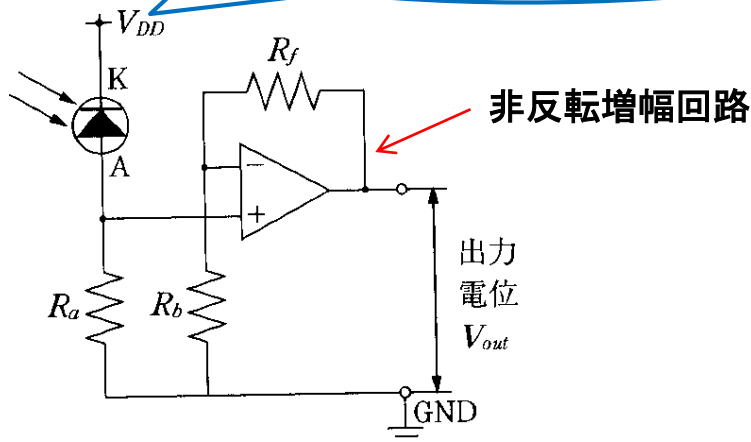
$$V_{out} = I_p R$$

<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>

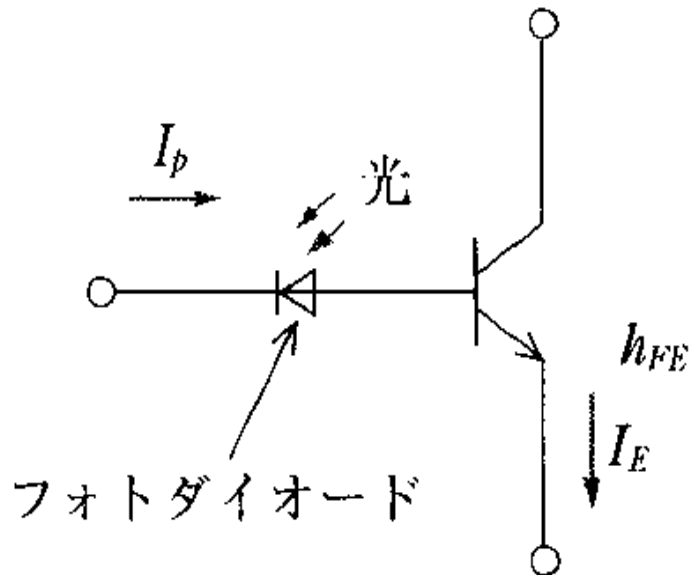
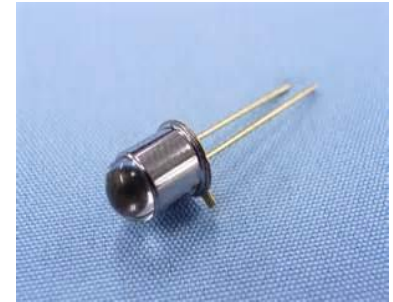


<バイアス電圧を与えた回路>

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

(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、応答時間は遅い。



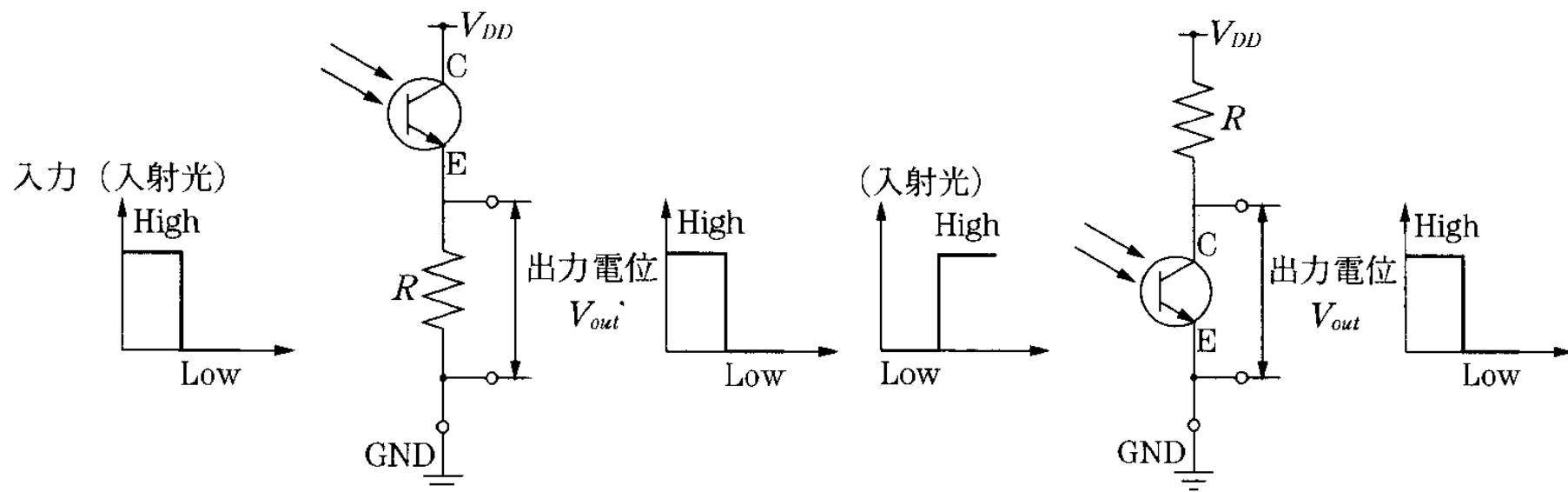
エミッタ電流は

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

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

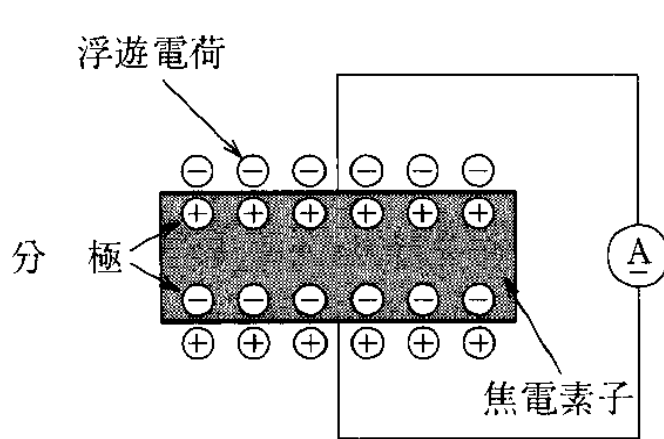
出力電位が入射光と**逆位相**

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)

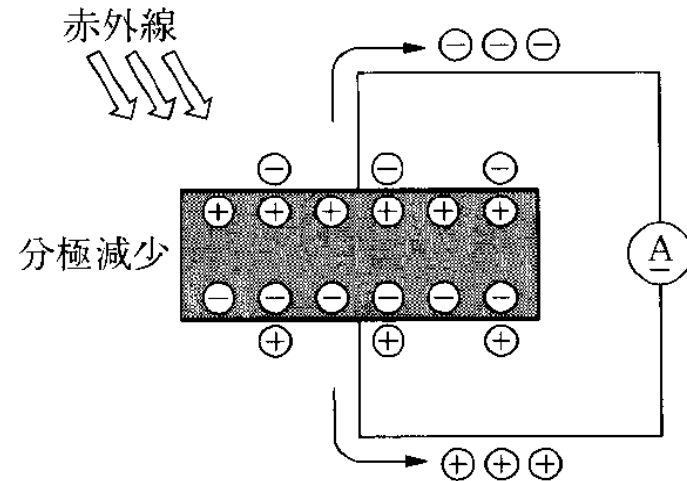


温度変化によって誘電体(PZT:チタン酸ジルコン酸鉛など)の分極(表面電荷)が変化する現象(焦電効果:Pyroelectric effect)を利用して、赤外線の変化や温度の変化に応じた電流を流すことができる



(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

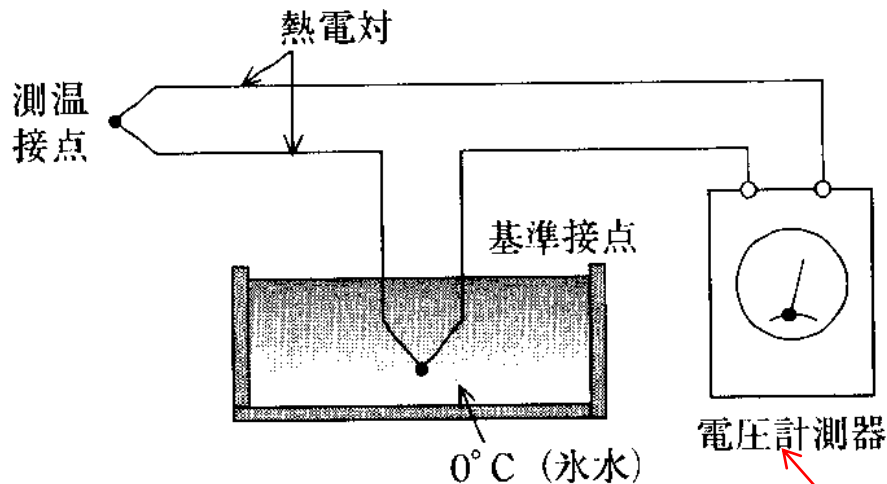
赤外線が照射されると、熱エネルギーによる焦電素子の温度上昇によって、分極が減少し、表面の電荷のみが減る。これによって、電荷が発生する。

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

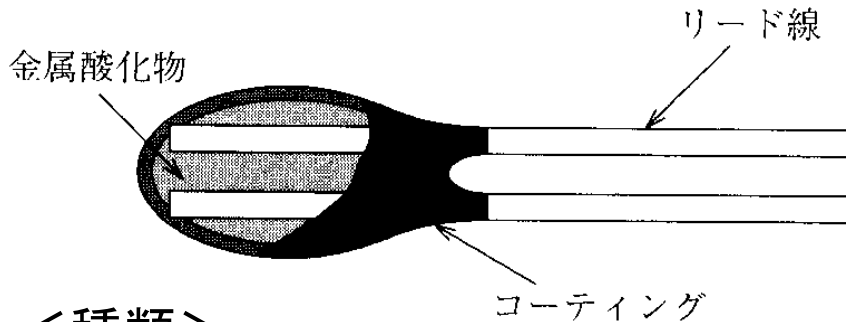
温度差に応じた(微弱)電流を、測定可能な電圧に変換して、電圧計測器で測定する

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)**

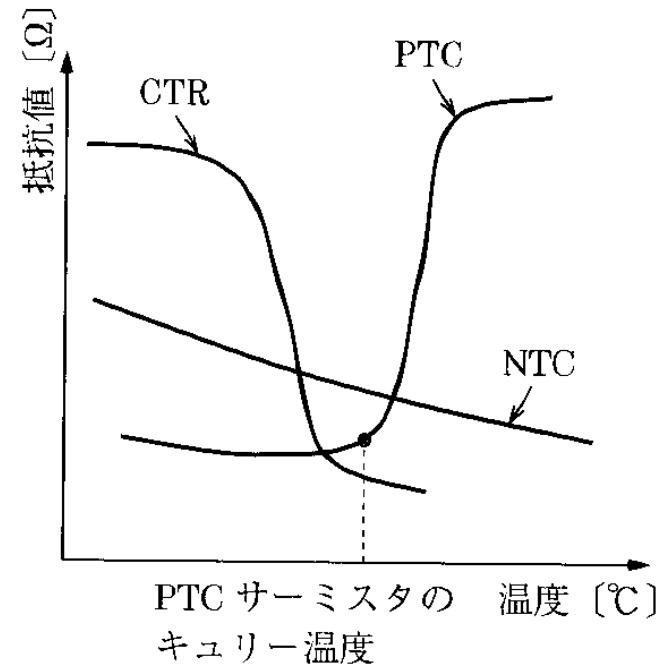
温度上昇に対して、抵抗値が減少し、測定範囲が広い(エアコンや冷蔵庫などの温度センサ)

- **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

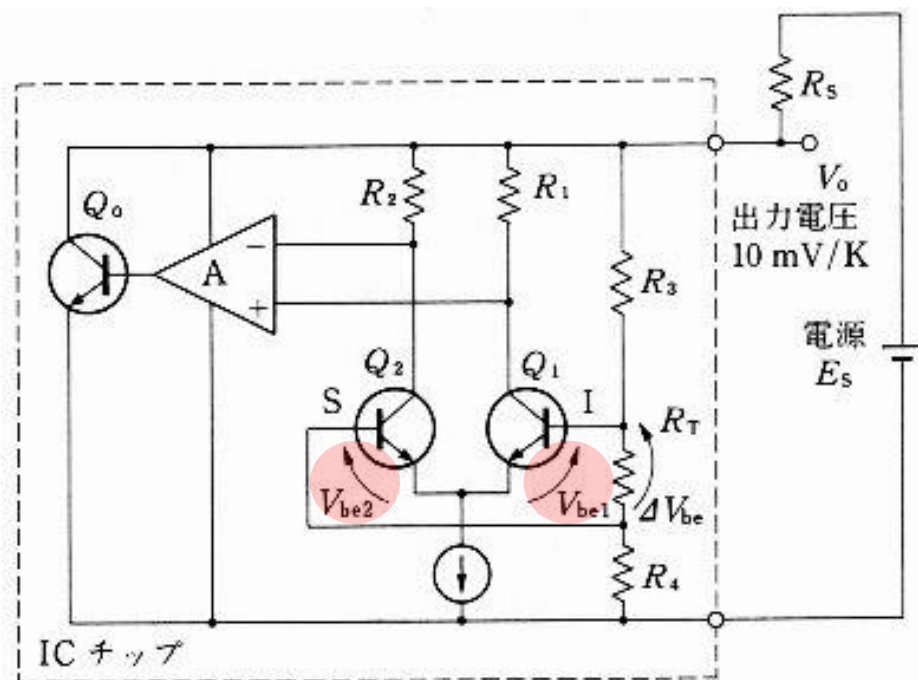
下の回路において、2つのトランジスタのベース・エミッタ間の電流の差は、

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

※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

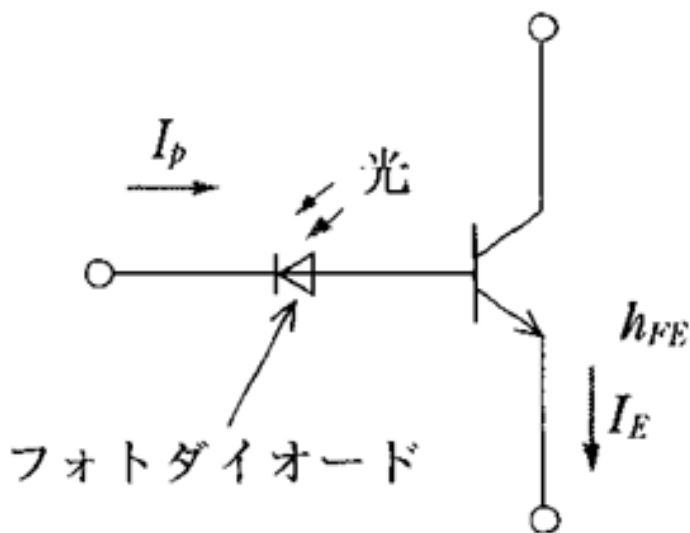
a. PNPトランジスタ(PNP Transistor)

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

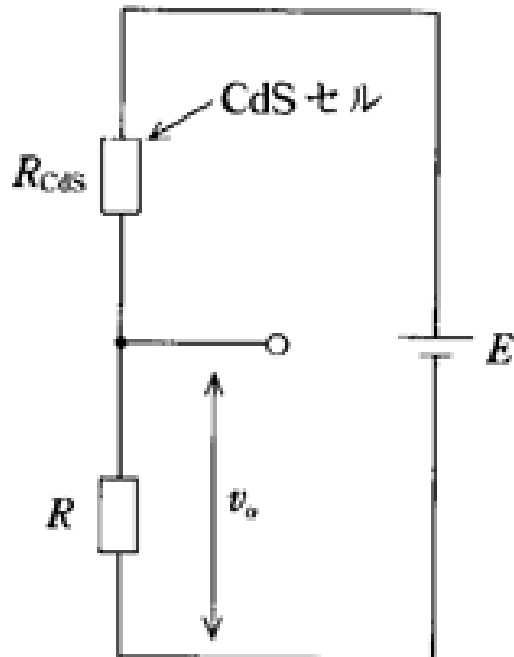
b. CTR

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。



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

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