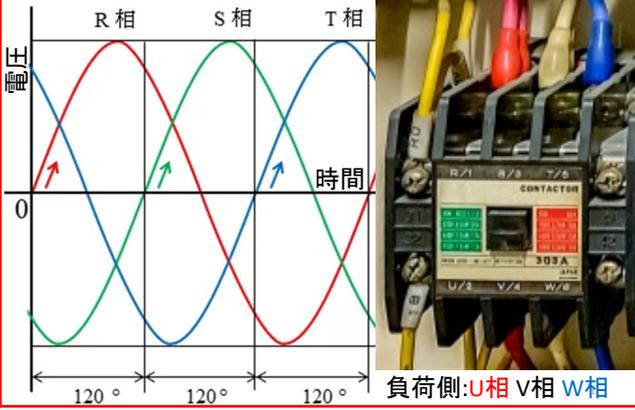


前回の復習: 3相交流とは?: R相:赤、S相:白、T相:黒or青で、位相が120度ずつずれた交流を示す。 R相 S相 T相



前回の復習: インピーダンスの計測:

コンデンサによるキャパシタンス C 、あるいはコイルによるインダクタンス L が回路に存在するとき、単なる抵抗 R とは異なり、印加される交流電圧と交流電流に位相差が生まれる。この時、インピーダンスは複素量で表現され、計測値は2つの値(実部と虚部)を持つ。
(\cdot が上に付いている変数は複素数)

インピーダンス: $\dot{Z} = R_S + jX_S$,
(R_S : 等価抵抗, X_S : 等価リアクタンス)

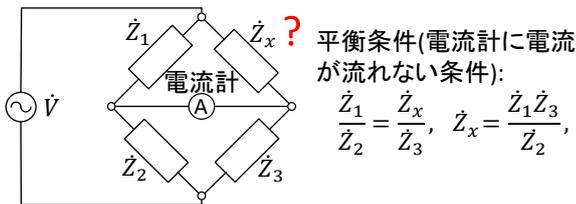
インピーダンスの逆数をアドミタンスと呼ぶ。

アドミタンス: $\dot{Y} = G_p + jB_p = \frac{1}{\dot{Z}} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{jX_p}$,
(G_p : 電導度, コンダクタンス, B_p : サセプタンス)

前回の復習: 交流ブリッジによるインピーダンス計測:

インピーダンス計測は、実部と虚部または振幅を位相を測定しなければならない。

⇒ 必然的に交流を用いた計測となる【交流ブリッジ】

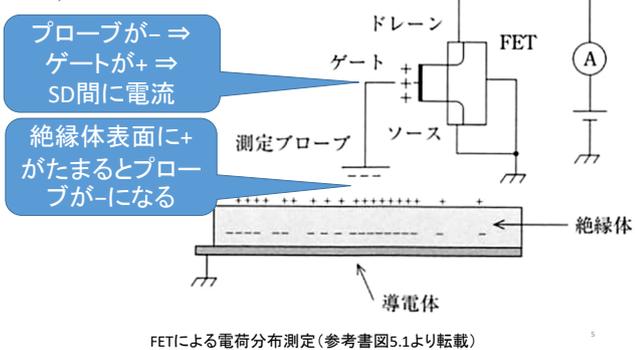


前回の復習: 人間の感覚とセンサ:

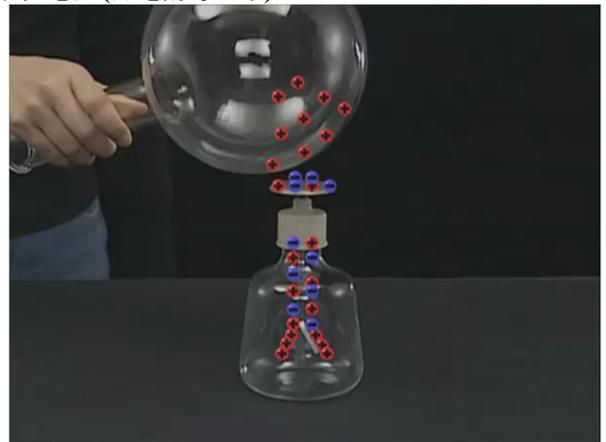
人間の器官	人間の感覚	センサの種類	センサ素子の例
目	視覚	光センサ	フォトダイオード、CCD
耳	聴覚	音響センサ	圧電素子、マイクロフォン
皮膚	触覚	振動センサ、圧力センサ、温度センサ	圧電素子、ひずみゲージ、サーミスタ、焦電素子
舌	味覚	味覚センサ	人工脂質膜、ISFET (Ion Sensitive FET),
鼻	嗅覚	臭気センサ	金属酸化物半導体、水晶振動子

電界の計測(1): 電界効果トランジスタ(FET)

高入力インピーダンスFETを使って、絶縁体の表面に発生する電位、あるいは電荷分布を非接触で測定する。(静電誘導)

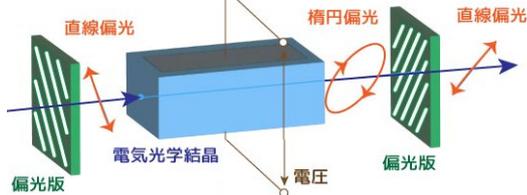


箔検電器(静電誘導現象):



電界の計測(2): 光電界センサ

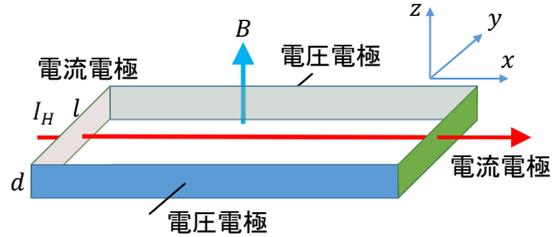
電気光学効果: 強誘電体ニオブ酸リチウム(LiNbO₃)などの電気光学素子に外部から電界を加えると、誘電率εが変化する。それに伴い、光の屈折率 $N(=\sqrt{\epsilon/\epsilon_0})$ も変化する。主屈折率の変化 \propto (電界) \Rightarrow 1次光学効果 or ポッケルス効果
 主屈折率の変化 \propto (電界)² \Rightarrow 2次光学効果 or カー効果



素子に印加された電界に比例して屈折率が変化し、光の偏光面が変化するので電界を乱すことなく測定可能。

磁界の計測(1): ホール磁気センサ

ホール素子の幅を l 厚さを d として、センサの z 方向に磁束密度 B_z を掛け、 x 方向に電流 $I_H(=j_x d l)$ を流すと、キャリアはローレンツ力を受け、 B_z に比例した **ホール起電力** $V_H(=E'_y l)$ が y 方向に生じる。これをホール効果(付録参照)という。
 $V_H = R_H I_H B_z / d$ となる。ここで R_H はホール定数と呼ばれる。

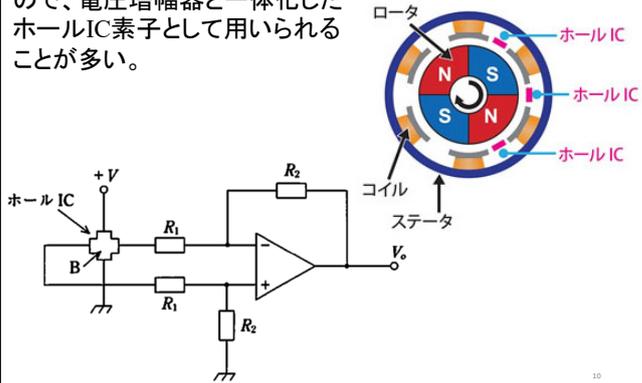


ホール効果

磁界の計測(1.1): ホールIC

使用例 フラシレスモータ

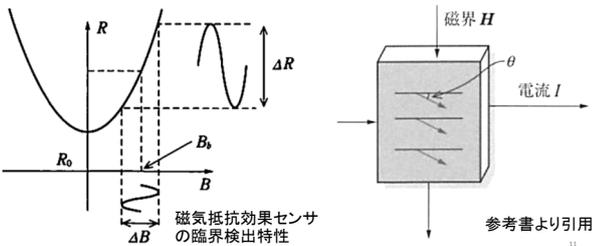
ホール素子の出力電圧は小さいので、電圧増幅器と一体化したホールIC素子として用いられることが多い。



磁界の計測(2): 磁気抵抗素子(Magneto Resistive sensor)

磁気抵抗効果: 外部磁場を印加するとホール効果と同様にLorentz力で電子の軌道が曲げられて電気抵抗が変化する現象である。低磁界下での磁束密度と抵抗変化の関係は、 $R=R_0(1+\alpha B^2)$ 、 R_0 :無磁界での抵抗、 B : 磁束密度、 α : 感度計数となる。

これを利用したセンサが磁気抵抗素子。

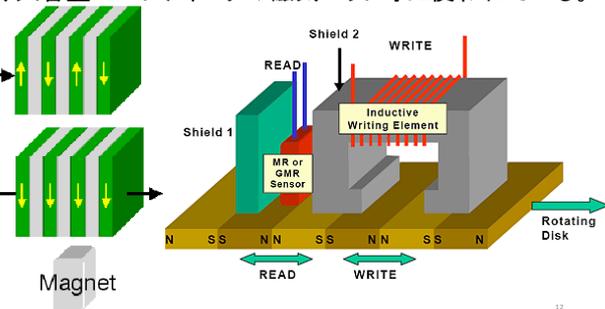


磁気抵抗効果センサの臨界検出特性

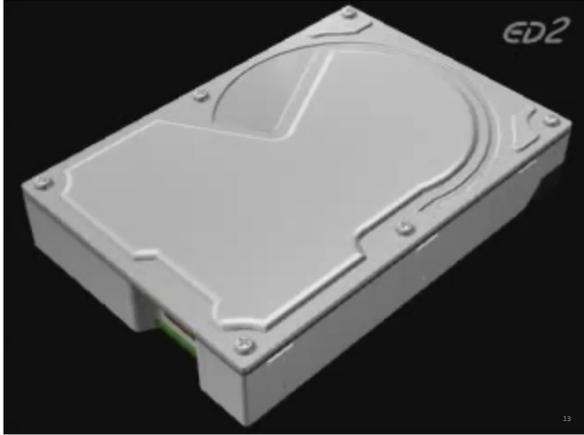
参考書より引用

磁界の計測(2.1): 巨大磁気抵抗素子(GMR sensor)

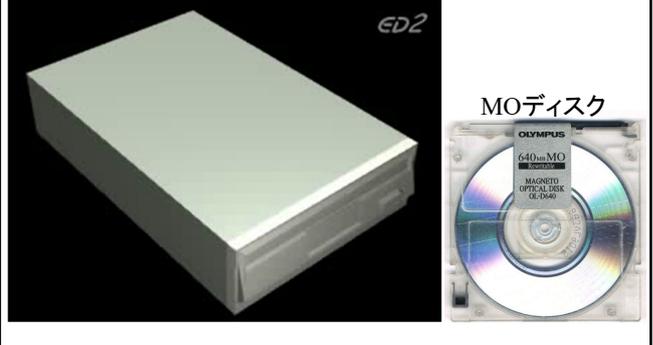
強磁性薄膜と非磁性薄膜の多層構造から構成される物質に磁場を印加すると、電気抵抗が大きく変化する効果を巨大磁気抵抗効果という。これを利用したセンサがGMR素子で、大容量ハードディスクの磁気ヘッド等に使われている。



ハードディスクドライブ (HDD): 磁性を利用した記憶装置

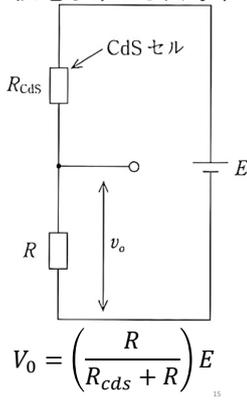
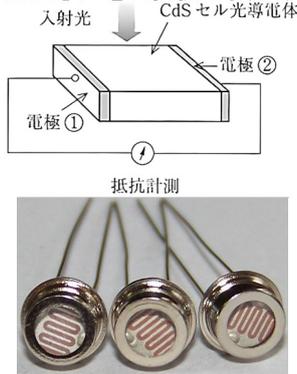


(参考) 磁気光学カー効果(Magneto-optical Kerr effect) 磁化した材料の表面に、偏光した光をあてると、反射光の偏光面が磁化の向きに応じて変わる現象である。MOディスクに使われている。

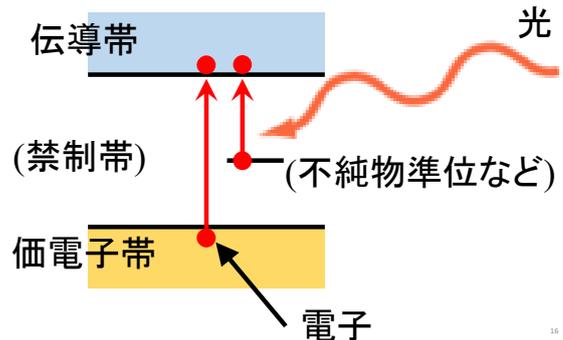


光計測(1): 光導電セル

光照射によって、光電効果で電子が価電子帯から伝導帯に励起され電気抵抗が変化する。

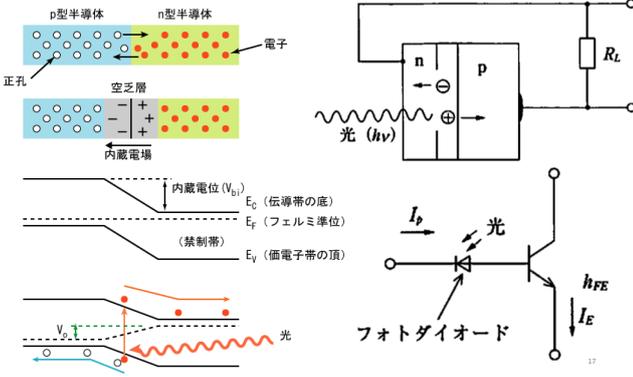


光電効果: 光照射によって価電子・不純物準位にいる電子が伝導帯以上に引き上げられて自由電子が増加し、電気抵抗が変化したり(光導電素子)、起電力が生じたり(光起電力素子)、電子が放出されたり(光電子放出)する。



光計測(2,3): フォトダイオード、フォトトランジスタ

光エネルギーを電気エネルギーに変換する。光が当たると、起電力が生じる。

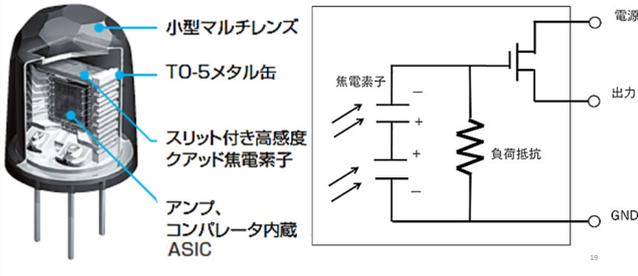


太陽電池:



光計測(4): 焦電型赤外線センサ

強誘電体タンタル酸リチウム(LiTaO₃)等に、赤外線が照射されると受光素子の温度が上昇して、焦電効果によって電気分極が誘起されるので、それを電圧変化として検出する。最大の用途は人体検知。窓材には適切なフィルタが装着される。



温度計測(1): 熱電対 第1回目で学習したゼーベック効果を利用する。測定したい温度範囲に応じていくつかの種類がある。

種類 Type	構成材料 Constituent material		使用温度(°C) Working temperature
	+側素線 Plus side wire	-側素線 Minus side wire	
K	クロメル Chromel	アルメル Alumel	0~1000°C
J	鉄 Iron	コンスタンタン Constantan	0~400°C
R	白金ロジウム Platinum rhodium	白金 Platinum	400~1400°C
B	白金ロジウム Platinum rhodium	白金ロジウム Platinum rhodium	800~1600°C
PR40-20	白金ロジウム Platinum rhodium	白金ロジウム Platinum rhodium	1000~1700°C

(余談) 熱電発電

開発中

積層型熱電変換素子

熱を電気に変える技術

温度計測(2): サーミスタ

温度で電気抵抗が変化するセンサ。-50 ~ +400°Cで利用

- NTC(negative temperature coefficient): 温度が上がると抵抗が減少。金属酸化半導体。汎用。
- PTC(Positive ...): 温度が上がると抵抗が増加。チタン酸バリウム(BaTiO₃)+レアアース。回路、ヒータの過熱防止。
- CTR(critical temperature resistor): 温度上昇に対し、特定の領域で抵抗が急激に減少。酸化バナジウム。温度スイッチ、温度警報器



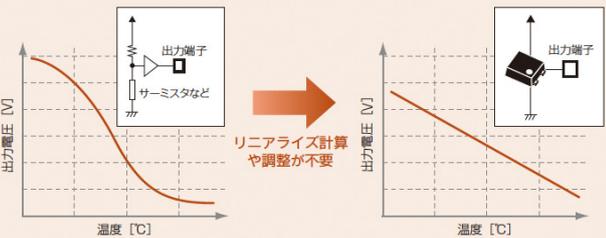
温度計測(3): IC温度センサ

半導体サーミスタに制御回路を付けて、サーミスタの温度-抵抗率の非線形性を補正して出力電圧を線形に補正している。センサ部分と制御回路を一つのパッケージに格納している。



●サーミスタなどで構成した場合

●当社アナログ出力センサICを使用した場合

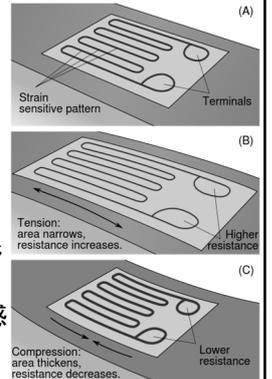


圧力の計測(1): 圧力によって物体が歪む、弾性体方式が多く利用される。

歪ゲージ: 物体の歪みを電気抵抗の変化から検出する。半導体製造技術を応用して微小金属細線(抵抗線)を絶縁基板上に一体化形成する。細線の抵抗値は次式で表される。

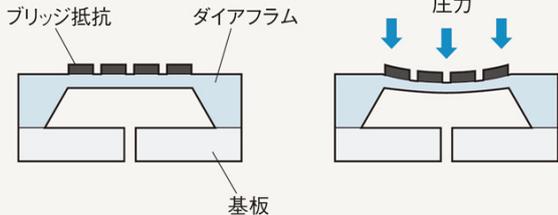
$$\frac{\Delta R}{R} = G \frac{\Delta L}{L}$$

ここで、Rは電気抵抗、ΔRは電気抵抗の変化、Lは抵抗線の長さ、ΔLは抵抗線の長さの変化分、Gはゲージ率。金属の代わりに半導体(ピエゾ抵抗効果形)を使った(2桁程度)高感度のももある。



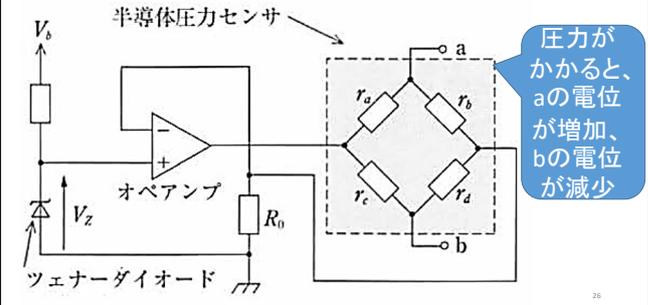
圧力の計測(2): 半導体圧力センサ

シリコン基板をエッチングしてダイアフラムを作製し、その上に不純物拡散によってピエゾ抵抗効果形歪ゲージ(前述)によるブリッジ抵抗を形成する。圧力が加わり半導体が歪むと、キャリア濃度と移動度が変わり、抵抗値が大きく変化する。



半導体圧力センサの電子回路例:

r_b, r_c は圧力を印加すると伸びる(抵抗増)方向に歪み、 r_a, r_d は縮む(抵抗減)方向に歪む様にブリッジ抵抗をダイアフラム上へ配置する。左側のオペアンプ回路で、 R_0 の両端に V_Z の電圧がかかり、センサに絶えず一定電流 V_Z/R_0 が流れる。

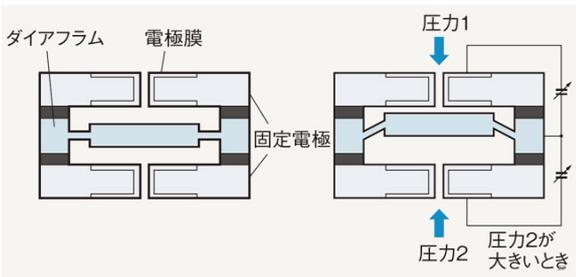


圧力の計測(2): 静電容量形圧力センサ

圧力を静電容量の変化として計測する。図に示す平行平板コンデンサの静電容量 C は電極の面積を A 、および電極間の距離を d として次式で与えられる。

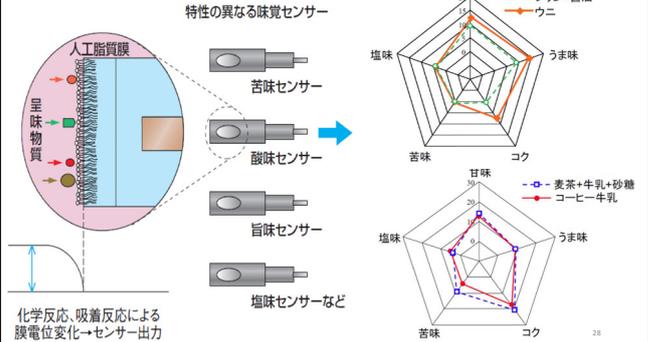
$$C = \epsilon A / d$$

ここで ϵ は誘電率。圧力が加わり、 d が変わると C も変わる。



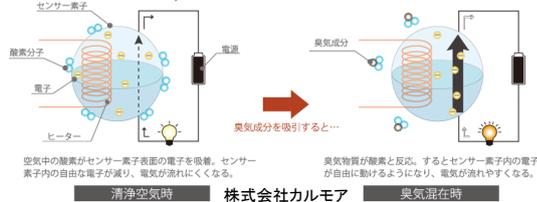
味の計測: 味覚センサ

苦味、酸味、旨味、塩味、甘味の5基本味(+α)の呈味物質が人工脂質膜に吸着した際の微細な膜電位の変化を電気化学的手法で測定する。



においの計測: 臭気センサ

金属氧化物半導体式や膜型表面応力式(Membrane-type Surface stress Sensor)で測定する。

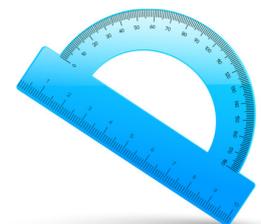


MSS中央部に塗布された感応膜に、ガス分子が吸着する事によって生じる力で応力が発生
細くなっている部分に埋め込まれた検知部(応力が加わると電気抵抗が変化)で電的に検知

次回の予告: センサーによる物理量の計測(2)

位置の計測
ある場所からの変位を位置として計測

1. 回転的変位を利用
 - ロータリエンコーダ
 - ポテンショメータ
 - 差動トランス
2. 直線的変位を利用
 - リニアエンコーダ
 - ポテンショメータ
 - 差動トランス



加速度の計測
速度の計測

(付録) ホール効果 (Hall Effect):

電場 \vec{E} と磁場 \vec{B} が両方存在する時の電子の運動方程式は、

$$m_e \frac{d\vec{v}}{dt} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) - \frac{m_e \vec{v}}{\tau}, \quad (13.1)$$

となる。右辺第1項が電場によるクーロン力、第2項が磁場による力、第3項が散乱体によって電子が散乱される効果を表している。今、磁場は z 方向に印加されているとすると、

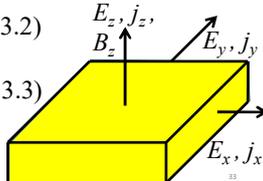
$$\vec{v} \times \vec{B} = (v_x, v_y, v_z) \times (0, 0, B_z) = (v_y B_z, -v_x B_z, 0),$$

なので、(13.1)式の運動方程式の各 x, y, z 成分は、

$$m_e \frac{dv_x}{dt} = -e(E_x + v_y B_z) - \frac{m_e v_x}{\tau}, \quad (13.2)$$

$$m_e \frac{dv_y}{dt} = -e(E_y - v_x B_z) - \frac{m_e v_y}{\tau}, \quad (13.3)$$

$$m_e \frac{dv_z}{dt} = -eE_z - \frac{m_e v_z}{\tau}, \quad (13.4)$$



となる。ここで、定常状態を考えると、電子の速度は一定なので、その時間微分は0となり、上の3式はそれぞれ、

$$v_x = -\frac{e\tau}{m_e}(E_x + v_y B_z), \quad v_y = -\frac{e\tau}{m_e}(E_y - v_x B_z), \quad v_z = -\frac{e\tau}{m_e}E_z,$$

となる。この内、最初の2つの式を用いて v_y について解くと、

$$v_x = -\frac{e\tau}{m_e}(E_x - (e\tau/m_e)(E_y - v_x B_z)B_z),$$

$$\{1 + (e\tau B_z/m_e)^2\}v_x = -(e\tau/m_e)(E_x - e\tau B_z E_y/m_e),$$

$$v_x = -\frac{e\tau}{m_e \{1 + (\omega_c \tau)^2\}}(E_x - \omega_c \tau E_y), \quad (\omega_c \equiv eB_z/m_e)$$

となる。同様に、同じ2つの式を用いて、 v_y について解くと、

$$v_y = -(e\tau/m_e)(E_y + (e\tau/m_e)(E_x + v_y B_z)B_z),$$

$$\{1 + (e\tau B_z/m_e)^2\}v_y = -(e\tau/m_e)(E_y + e\tau B_z E_x/m_e),$$

$$v_y = -\frac{e\tau}{m_e \{1 + (\omega_c \tau)^2\}}(E_y + \omega_c \tau E_x)$$

となる。従って、電子密度を n_e とすると電流密度の各成分は、

$$j_x = -n_e e v_x = \frac{n_e e^2 \tau}{m_e \{1 + (\omega_c \tau)^2\}}(E_x - \omega_c \tau E_y), \quad (13.5)$$

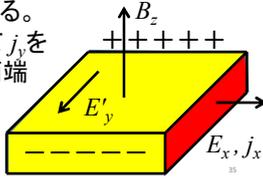
$$j_y = -n_e e v_y = \frac{n_e e^2 \tau}{m_e \{1 + (\omega_c \tau)^2\}}(E_y + \omega_c \tau E_x), \quad (13.6)$$

$$j_z = -n_e e v_z = \frac{n_e e^2 \tau}{m_e} E_z, \quad (13.7)$$

となる。

今 x 方向だけに外部電場 E_x を印加すると、(13.5),(13.6)式から電流 j_x と j_y が流れるはずである。

しかし、 y 方向には導線を遮断して j_y を流れないようにすると、 y 方向の両端に電荷が蓄積して、内部電場 E'_y が発生する。この時の E'_y の大きさは(13.6)式で $j_y=0$ とおくと、



$$j_y = 0 = \frac{n_e e^2 \tau}{m_e \{1 + (\omega_c \tau)^2\}}(E'_y + \omega_c \tau E_x), \quad E'_y = -\omega_c \tau E_x, \quad (13.7)$$

となる。またこの時 j_x は、(13.5)式から、

$$j_x = \frac{n_e e^2 \tau}{m_e \{1 + (\omega_c \tau)^2\}}(E_x - \omega_c \tau E'_y)$$

$$= \frac{n_e e^2 \tau}{m_e \{1 + (\omega_c \tau)^2\}}\{E_x + (\omega_c \tau)^2 E_x\} = \frac{n_e e^2 \tau}{m_e} E_x, \quad (13.8)$$

となる。よって、ホール係数 R_H を、

$$R_H \equiv \frac{E'_y}{j_x B_z} = \frac{-\omega_c \tau E_x}{n_e e^2 \tau E_x B_z / m_e} = \frac{-m_e \omega_c}{n_e e^2 B_z} = \frac{-1}{n_e e}, \quad \left(\omega_c \equiv \frac{eB_z}{m_e}\right)$$

(13.9)と定義すると、 R_H を実験的に測定することで、電子密度 n_e を求めることができる。また、半導体の場合には、キャリアが正孔か電子かでホール係数の正負が変わるので、 p 型半導体か n 型半導体かを判別することができる。

また、電気伝導度 σ 、

$$\sigma = \frac{j_x}{E_x}, \quad (13.10)$$

を使うと、キャリアの移動度 μ は、

$$\mu \equiv \frac{\sigma}{n_e e} = -R_H \frac{j_x}{E_x} = \frac{-E'_y}{j_x B_z} \frac{j_x}{E_x} = \frac{-E'_y}{E_x B_z}, \quad (13.11)$$

となり μ も実験的に測定することができる。これらの現象をホール効果という。(半導体工学参照)

(応用例)

ホール素子(磁気センサー)