

各種回路素子

奈良教育大学 藪 哲郎

1. 電気回路と電子回路

電気回路と電子回路は混同して使われることもあるが、電気（電子）工学の分野では次のように使い分けられる。電気回路は「抵抗」「コイル」「コンデンサ」「直流あるいは交流電源」だけを含む回路を指す。電子回路は電気回路の素子に加えて、ダイオード、トランジスタ、オペアンプなどの素子を加えて構成する回路を指す。

イメージとして、電気回路は高い電圧・大電流（電圧は 30 V 以上、電流はアンペアオーダー）を扱い、電子回路は低い電圧・小さな電流（電圧は 30 V 以下、電流は mA オーダー）を扱う。

「電子回路」という言葉は、電子の働きを活用した回路を指し、最初は真空管を含む回路であった。今は真空管はダイオードやトランジスタで置き換えられ、使われることはほとんどなくなったが、「電子回路」という言葉はそのまま使われている。ダイオードやトランジスタも電子の働きを活用した素子なので、「電子回路」という言葉を使うことに問題はない。

2. 基本的な素子

2.1 抵抗 [R] 単位：Ω(オーム) 記号

電圧と電流は比例関係にある。 $V = IR$ の関係が成立する。抵抗の単位はオームといい Ω で表す。抵抗値は数Ωから数 MΩ (M(メガ): 10^6) のものまでである。抵抗に塗られている 4 本（高精度の抵抗は 5 本）の輪の色が抵抗値を表す。

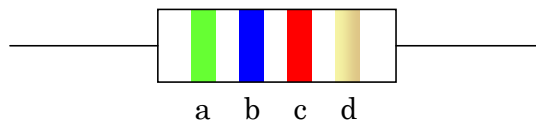


図 1 抵抗の例（4 本帯）

4 本の場合、最初の 3 本が数値を表し、残りの 1 本が誤差を表す。図 1 の場合、 a, b, c の色が抵抗値を表し、その数値は $ab \times 10^c$ である。 d は誤差を表す。抵抗に左右の区別はないので、どちらから読むか迷うかも知れない。誤差を表す帯はたいていの場合「金色」であり、金色は数値を表す色としては使われていないので、金色の帯があったなら、それ

以外の3本が数値を表す帯であると見なすとよい。

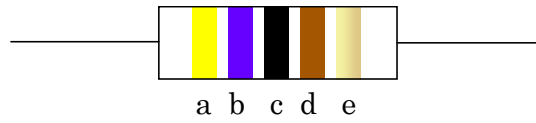


図2 抵抗の例 (5本帯)

図2はカラーコードが5本の場合である。この場合は $abc \times 10^d$ が抵抗値を表し、 e が誤差を示す。

色と数値の関係とその覚え方を表1に示す。色は読み誤る恐れがあるので、念のためテストで測るようにする。筆者が学生するとき「抵抗値の色帯は読むな。テストで測れ」と習った。金と銀は通常は誤差を表すのに使われる色であるが、マイナスの指数を表すのに使われることもある。色のうち、赤～紫の部分は光の波長が長い順に並んでいる。

表1 カラーコードとその覚え方

数値	色	覚え方
0	黒	黒い礼服
1	茶	茶を一杯
2	赤	赤い人參
3	橙	橙みかん 第三の男 第三者
4	黄	黄信号 岸恵子 起死回生
5	緑	緑はGO 嬰兒 (みどりご)
6	青	青虫 青二才のろくでなし
7	紫	紫式(七)部 紫なすび
8	灰	ハイヤー
9	白	ホワイトクリスマス 白熊
-1	金	
-2	銀	

表2 誤差を表す色と対応する値

色	誤差
金	±5%
銀	±10%
茶	±1%
赤	±2%

誤差を表す色と対応する値を表2に示す。大抵の抵抗は金色である。

図1の抵抗は $56 \times 10^2 = 5.6 \text{ k}\Omega \pm 5\%$ であり、図2の抵抗は $470 \times 10^1 = 4.7 \text{ k}\Omega \pm 5\%$ である。

4本帯の抵抗の場合、最初の2つの帯の値として10~99までのあらゆる数値の抵抗が生産されているわけではない。表3のような系列の抵抗が生産されている。表3の値は比が等間隔で並んでいる。E6系列の場合、 $15 = 10^{1+\frac{1}{6}}$, $22 = 10^{1+\frac{2}{6}}$, $33 = 10^{1+\frac{3}{6}}$, $47 = 10^{1+\frac{4}{6}}$, $68 = 10^{1+\frac{5}{6}}$ である。 $10^{\frac{1}{6}} = 1.47$ なので、10, 15, 22, 33, 47, 68という系列は比が1.47の等比級数となっている¹。

表3 抵抗の値

E6 系列	E12 系列
10	10
	12
15	15
	18
22	22
	27
33	33
	39
47	47
	56
68	68
	82

¹ 正確な数値は1.467, 2.154, 3.162, 4.641, 6.812 (小数点第4位切り捨て)なので、3.3と4.7は少しずれている。理由はよく分からない。きりのよい比を作るにはこの数値が最適と書いてあるサイトがあるが、正しいかどうかは分からない。

抵抗を購入する場合、許容電力に注意する必要がある。1/2 W, 1/4 W, 1/8 W などの製品がある。抵抗で消費される電力は次式で求められる。

$$P = VI = I^2R = \frac{V^2}{R}$$

電力を求めるときは I^2R を用いることが多い。例えば、LED の電流制限抵抗として 560 Ω を使い、流す電流が 20 mA のとき、 $P = 20 \times 20 \times 10^{-6} \times 560 = 0.224 \text{ W}$ なので、余裕を見て 1/2 W のものを購入する。電子工作において定番的に用いられる抵抗は 1/4 W のものである。

2.2 コンデンサ (キャパシタ) [C] 単位: F (ファラッド) 記号

日本ではコンデンサと呼ばれるが、英語ではキャパシタと呼ぶ。コンデンサにかかる電圧 v とコンデンサを流れる電流 i は以下の関係を持つ。

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

コンデンサの単位はファラッド [F] で表し、容量と呼ぶ。容量は数 pF (p (ピコ): 10^{-12}) ~ 数千 μF (μ (マイクロ): 10^{-6}) までである。電気二重層コンデンサ (キャパシタと呼ばれることもある) は数 F ~ 数十 F であるが、特性が他のコンデンサと大きく異なるため、ここでは除外する。

コンデンサの容量を表すとき、日本では pF か μF という表記が通常使われ、nF (ナノファラッド: ナノは 10^{-9}) という表記はあまり見かけない。一方、海外の回路図、デジタルマルチメータで容量を測るとき、回路シミュレータでは nF という表記も使われる。

コンデンサの種類 (電気二重層コンデンサは除く)

コンデンサを大きく分けると 2 種類に分かれる。極性を持たないコンデンサと極性を持つコンデンサである。極性を持たないコンデンサの 2 つの端子に区別はない。かける電圧は土に変化してよい。極性を持つコンデンサは + 端子と - 端子を持ち、+ 端子にかかる電圧は常に - 端子にかかる電圧よりも常に大きくなってはならない。

極性を持たないコンデンサ

比較的小容量であり、1 pF ~ 10 μF 程度の製品がある。耐圧 (コンデンサにかけてよい電圧) は通常は 50 V 以上なので、電子工作に用いる場合、耐圧は考えなくて良い。

極性を持たないコンデンサは「セラミックコンデンサ」と「フィルムコンデンサ (ポリエステルコンデンサ、ポリプロピレンコンデンサ、メタライズドフィルムコンデンサなど)」

の2つに大別できる。セラミックコンデンサは安価で高周波特性がよいが、温度が変わると容量が変化する。フィルムコンデンサは少し高価だが、温度に対する容量の変化が小さい。

極性を持つコンデンサ

大容量であり、1 μF ~10000 μF 程度の製品がある。「アルミ電解コンデンサ」と「タンタル電解コンデンサ」の2種類がある。大容量のものは「アルミ電解コンデンサ」のみである。同じ容量であればサイズは「タンタル電解コンデンサ」の方が小さい。

足の長い方が+端子である。アルミ電解コンデンサの場合は-端子に「-」マークが描かれている。タンタル電解コンデンサの場合は+端子に「+」マークが描かれている。

+端子は-端子より常に電圧が高くなくてはならない。極性を逆に接続すると、液漏れ・発熱・発煙・発火・破裂の危険性がある。これらの現象が起こらない場合でも、非可逆の化学反応がコンデンサ内で起こり、容量低下などの悪影響をおよぼす。そして、あるとき突然故障する可能性が高まるので、一回でも逆接続を行った電解コンデンサは、その時は使用できても、捨てる方が無難である。

普通「電解コンデンサ」というと、アルミ電解コンデンサを指す。耐圧は16 V, 25 V, 50 V, 100 V など様々な製品があるので、使用電圧より高い耐圧のものを選ぶ。アルミ電解コンデンサは同じ容量でも耐圧が高くなるほどサイズが大きくなり価格も高くなる。

タンタル電解コンデンサはアルミ電解コンデンサに比べると遙かに小型であるが、逆電圧に弱く、故障すると、オープンではなくショートするという問題がある。

コンデンサの容量の読み方

アルミ電界コンデンサの容量は「47 μF 」のように書いてある。耐圧は「16 V」のように電圧が書いてある。

タンタル電解コンデンサの容量は $\frac{22}{16+}$ のように書いてあるとき、容量は22 μF 、耐圧16 Vである。「+」マークが付いている電極が+極であり、-極に比べると長い。

それ以外のコンデンサの場合、3桁の数字がコンデンサに描かれている。abc と書かれているとき、容量は $ab \times 10^c$ pF である。

数字の後に書いてあるローマ字は誤差を表す。表4の関係がある。

表4 コンデンサの誤差

J	K	M
$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 20\%$

2.3 コイル (インダクタ) [L] 単位: H (ヘンリー) 記号

コイルにかかる電圧 v とコイルを流れる電流 i は以下の関係を持つ。

$$v = L \frac{di}{dt}$$

コイルはスイッチング電源の回路などに用いる。色々な製品があり、製品によって形は異なる。コンデンサの容量は 3000 円程度のデジタルマルチメータで測定できるが、コイルのインダクタンスを測定するには、LCR メータが必要であり、3 万円以上する²。一部の製品は抵抗と同様にカラーコードで L の値を表している。

2.4 ダイオード 記号

電圧のかかる方向によって電流が流れたり流れなかったりする。電圧と電流の関係を単純化すると、図 3 のようになる。

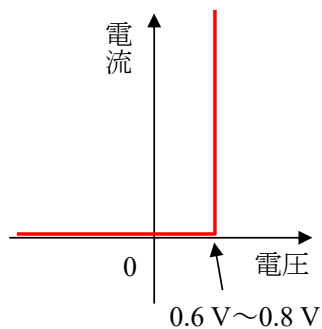


図 3 ダイオードにおける電圧と電流の関係

ここではシリコンダイオードの場合を示す。図中、赤線が折れ曲がっている場所の電圧を順方向電圧 V_F と呼び、シリコンダイオードの場合、 $0.6\text{ V} \sim 0.8\text{ V}$ である。ショットキーバリアダイオードの順方向電圧は $0.2\text{ V} \sim 0.3\text{ V}$ 程度なので、小さな順方向電圧が必要な場合はショットキーバリアダイオードを用いる。ただし、逆方向の漏れ電流はシリコンダイオードより大きい。

発光ダイオードの場合は赤色が 1.8 V 、青色が 3.2 V 程度の値をとる (電流 10 mA のとき)。緑色は 2 種類あり、 2.1 V 程度のものと、青色 LED に近い 3 V 程度のものがある。

ダイオードは「流してよい電流の最大値」「かけてよい逆電圧の最大値」を確認して使用する。LED の逆方向電圧の耐圧は小さい (10 V 以下)。通常のダイオードの場合逆方向電

² 筆者が使っているサンワの LCR700 は 3 万円強である (L の測定下限は 20 uH)。7500 円の激安品もあるが、 L の測定下限が 200 uH である。

圧の耐圧は 100 V 以上ある。

2.5 トランジスタ

電流を増幅する素子で 3 つの端子を持つ。npn 形と pnp 形の 2 種類がある。npn 形の方が高周波特性が良いので、npn 形が用いられることが多い。ただし、プッシュプル回路のように同等の特性を持つ npn 形と pnp 形をペアとして用いる場合や、pnp 形しか用いることが出来ないような回路構成をとる場合は、pnp 形も用いられる。

以下の説明は npn 形に対して行う。トランジスタとその等価回路を図 4 に示す。

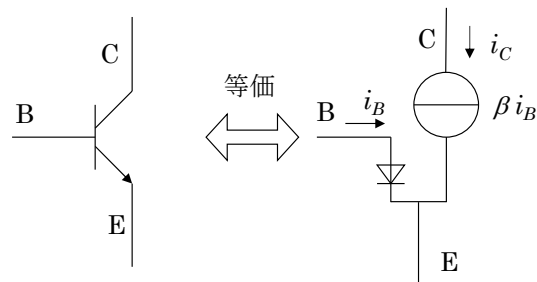


図 4 npn 形トランジスタとその等価回路

ベース-エミッタ間の特性はダイオードと同じである。ベース電流を i_B 、電流増幅率を β とするとき、コレクタ→エミッタを流れる電流は βi_B となる。コレクタ-エミッタ間に大きさ βi_B の電流源がある。電流源とは指定された電流を強制的に流そうとする電源であり、端子間の電圧は、指定された電流を流すための値に自動的に設定される。電流増幅率 β は 100~400 程度の値をとる。

$$i_C = \beta i_B$$

の関係がある。

日本製のトランジスタは 2SC1815Y のような型番がついている。2SA と 2SB が pnp 形、2SC と 2SD が npn 形を表す。次の 3~4 桁がモデルナンバー、末尾のローマ字は増幅率を表す。末尾のローマ字と増幅率の関係は 2SC1815 の場合、表 5 の通りである。波長が短くなるほど増幅率が高くなる。

表5 増幅率を表す文字

文字	増幅率
O (Orange)	70 ~ 140
Y (Yellow)	120 ~ 240
GR (Green)	200 ~ 400
BL (Blue)	350 ~ 700

2SAなどの型番はJISで規定されている。海外製のトランジスタの場合、JISには従わないので、2N5088あるいはBC337のような型番がついている。

トランジスタのデータシート (datasheet) には様々な数値が記されているが、着目すべきパラメータは「増幅率」「最大コレクタ電流」「最大コレクタ損失」の3つである。

増幅率はベース電流とコレクタ電流の比率を表す。ただしコレクタ電流が大きくなるほど増幅率は落ちる。

最大コレクタ電流はコレクタに流して良い最大の電流である。例えばコレクタ電流でモータを駆動し、モータに流れる最大電流が1Aの場合、最大コレクタ電流が1A以上のトランジスタを選択する。

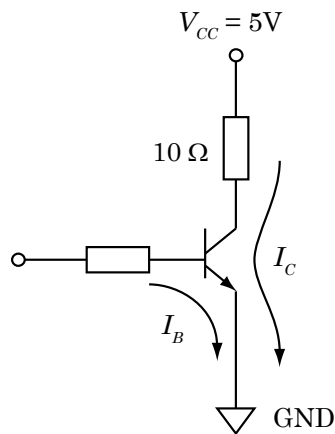


図5 トランジスタ増幅回路

最大コレクタ損失はトランジスタで消費する電力の最大値である。図5の回路について考える。例えば $I_B = 1 \text{ mA}$ 、 $\beta = 100$ のとき、 $I_C = 100 \text{ mA} = 0.1 \text{ A}$ となる。10 Ω の抵抗における電圧降下は $10 \Omega \times 0.1 \text{ A} = 1 \text{ V}$ であるから、残りの4Vはトランジスタにかかる。電流 I_C は0.1Aであるから、トランジスタにおいて $4 \text{ V} \times 0.1 \text{ A} = 0.4 \text{ W}$ の電力が消費され、トランジスタは発熱する。このトランジスタにおける消費電力が最大コレクタ損失を上回

らないようにする。場合によっては、放熱板の取り付けが必要なケースもある。

2.6 FET (電界効果トランジスタ)

トランジスタは ベース→エミッタ を流れる電流の β 倍が コレクタ→ エミッタ に流れるというタイプの素子であった。電流増幅と呼ばれる。また、等価回路においては増幅された結果は電流源として表される。

これに対して FET は増幅された結果が電流源となる点に関しては同じであるが、増幅の源となるものは ゲート→ソース 間の電圧である。

FET は大きく分けると 2 種類あり、電圧のかけ方が異なる。1 つは JFET (Junction FET: 接合形 FET)、もう一つは MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET: 金属酸化膜形 FET) である。トランジスタと同様、それぞれに n チャンネルのものと p チャンネルのものがある。回路記号を図 6 に示す。

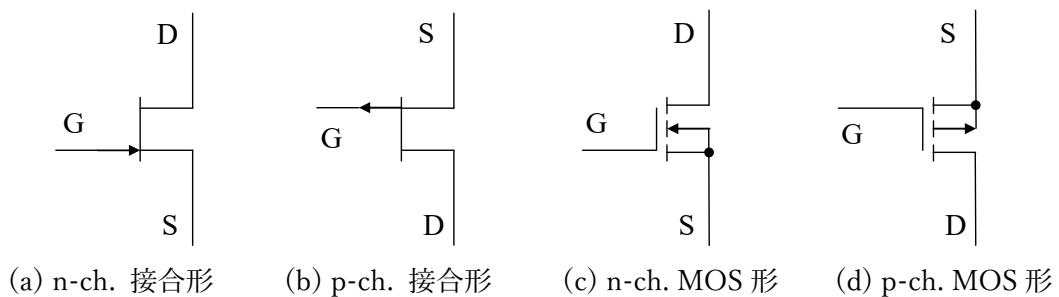


図 6 FET の回路記号

G, D, S はそれぞれゲート、ドレイン、ソースの略であり、電流は上から下向きに流れる。図 6 と少し異なる回路記号が用いられることもある。JFET は増幅用、MOSFET はスイッチとして用いられることが多い。

図中の矢印は、JFET、MOSFET のいずれにおいても、FET 内に形成されるダイオードの向きを示す。

JFET の場合、矢印の向きに電流が流れないような方向に電圧をかけて使う。入力インピーダンスが高いため、ゲート端子は他の端子とは接続されていないと考える。MOSFET の場合、ゲートは絶縁されているので入力インピーダンスは更に高くなる。

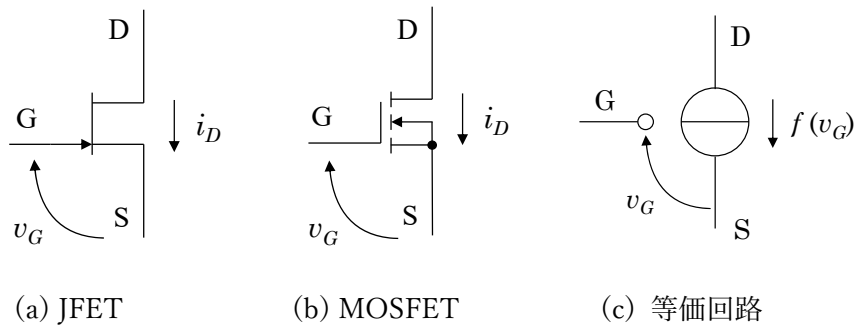


図7 n-ch. FET とその等価回路

図7に n-ch. FET とその等価回路を示す。JFET, MOSFET とともに同じ等価回路となる。FET はゲート電圧 v_G によってドレイン電流 i_D を制御する素子である。

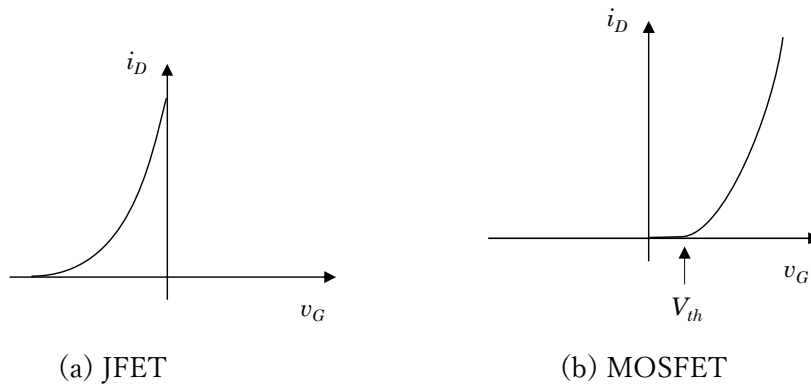


図8 n-ch. FET の特性

n-ch. JFET の特性を図8 (a) に示し、n-ch. MOSFET の特性を同図 (b) に示す。JFET と MOSFET ではドレイン電流 i_D のオーダーが異なる。JFET の最大電流は数十 mA のオーダーであるのに対して、MOSFET の電流は A のオーダーになることもある。

MOSFET におけるドレイン電流 i_D は v_G が閾値電圧 V_{th} より大きいとき

$$i_D = \alpha(v_G - V_{th})^2$$

となる。 α は比例係数である。

2.7 オペアンプ

アナログ回路を設計するとき、なくてはならない便利な素子である。入力端子が2つ、出力端子が1つあり、図9のような記号で表される。回路図には電源は示されないが、現実の素子は3つの入出力端子以外に電源供給用の端子が2つあるので、オペアンプには最低5個の端子が必要である。入出力特性は以下の式で表される。

$$V_o = A_v(V_+ - V_-)$$

ここで、 A_v は極めて大きな値（10 万倍以上）なので、回路計算をするときは無限大とみなす。ゆえにオペアンプの入出力特性は図 10 のようになる。

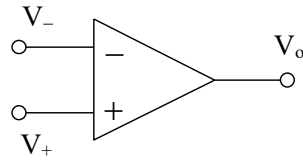


図 9 オペアンプの記号

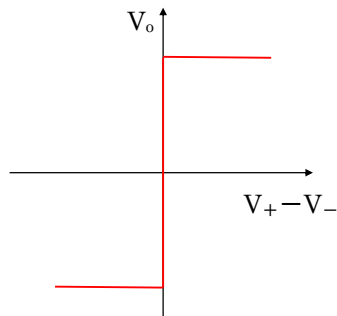


図 10 オペアンプの入出力特性

オペアンプの使い方は次の 2 通りである。

1. 負帰還 (Negative Feedback) の考え方を取り入れて増幅率を落とし、電圧を増幅する素子として用いる。2 つの基本的な回路パターンがある。仮想短絡 (Virtual Short) の考え方をを用いると、入出力特性は簡単に導出することができる。
2. 2 つの入力電圧の大小関係を比較する素子 (コンパレータ) として使用する。

負帰還に基づいた回路を図 11 に示す。

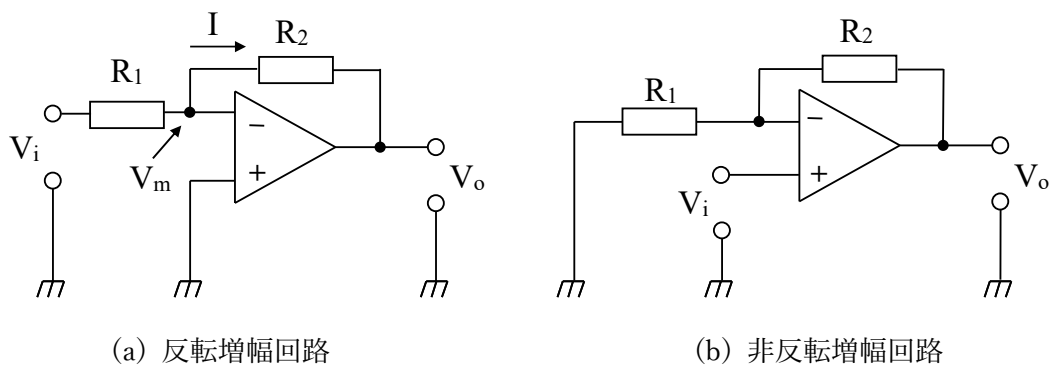


図 11 オペアンプを用いた増幅回路

それぞれ、入出力関係は次のようになる。

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad (\text{反転増幅回路})$$

$$V_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_i \quad (\text{非反転増幅回路})$$

オペアンプをコンパレータとして使用すると、速度が遅くて問題がある場合は、コンパレータ専用の IC があるので、そちらを使う。

オペアンプには数え切れないくらいの型番がある。型番は 3~4 桁の番号で表される。別の会社から互換品（セカンドソースと呼ぶ）が発売されていることが多い。例えば 072 という型番のオペアンプには TI 社の TL072, 日清紡マイクロデバイス（元は新日本無線）の NJM072 などがある。オリジナルを作った会社が現在は吸収合併などで存在しない場合も多く、オリジナルとセカンドソースの違いは気にしなくて良い。

2010 年頃の有名なメーカーとしては、TI (Texas Instruments), NS (National Semiconductor), Analog Devices, Linear Technology, 新日本無線などがあつた。2011 年に TI が NS を買収し、2017 年に Analog Devices が Linear Technology を買収した。新日本無線は 2022 年にリコー電子デバイスと合併して日清紡マイクロデバイスとなった。

オペアンプのとして 5532 は有名な型番であるが、2 つの入力の間にはダイオードが入っている。5532 はコンパレータとして使うことはできない。

3. センサー用素子

3.1 CdS セル

表面に硫化カドミウムの電気経路があり、光が当たると抵抗値が下がる。フォトダイオードやフォトトランジスタと比べると反応が遅いという欠点を持つが、安価で理解しやすい

いのが特長である（明るさによって抵抗値が変わるのでテストで抵抗値を測定できる。一方フォトダイオードやフォトトランジスタは明るさによって微弱な電流値が変わる）。

しかし、有害物質であるカドミウムを使っているという問題があるので、現在はまだ入手可能であるが、将来は生産停止となるかもしれない。

2003年1月にEU（ヨーロッパ連合）加盟国15カ国でRoHS（Restriction on Hazardous Substances）という指針が採決され、2006年7月以降に同圏内で発売される製品については特定物質の使用が禁止された。RoHSによって指定された禁止物質は6種類で、鉛、水銀、カドミウム、六価クロム、ポリ臭化ビフェニール（PBB）、ポリ臭化ジフェニルエーテル（PBDE）である。

従来のハンダはスズと鉛の合金なので、RoHSに対応するには鉛フリーハンダを使う必要がある。従来のスズ63%、鉛37%の鉛入りハンダの融点が183°Cなのに対して、スズ96.5%、銀3%、銅0.5%の鉛フリーハンダの融点は217°Cである。鉛フリーハンダは従来のハンダよりも溶けにくく流動性も悪く扱いづらい。温度調節機能付きの半田ごてが必要であると言われているが、従来の半田ごてでも慣れれば大きな問題はない。

3.2 フォトダイオード・フォトトランジスタ

光の強度によって流れる電流が変わる。フォトトランジスタの方が感度が高いが、「応答速度が遅い、リニアリティ（光量と電流が比例すること）が低い」という欠点がある。

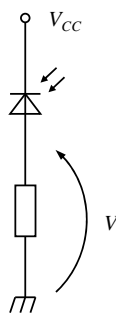


図12 フォトダイオードの回路

フォトダイオードは図12のように接続して用いる。フォトダイオードの部分が受光強度によって値が変化する電流源として振る舞うので、電圧 V は明るさによって変化する。