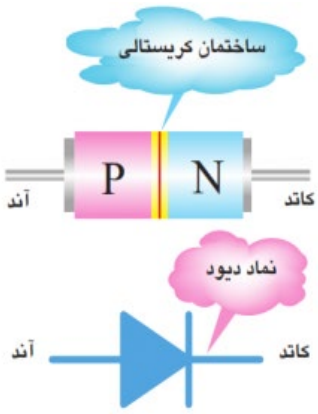
فصل سوم

قسمت اول

ادوات الکترونیکی: دیود، ترانزیستور، تریستور

دیود Diode

دیود یکی از ساده ترین المان های الکترونیکی است که کاربرد بسیاری در صنعت الکترونیک از جمله یکسوسازی، چند برابر کننده های ولتاژ، برش دهنده های ولتاژ و .... دارد. دیود جریان الکتریکی را در یک جهت از خود عبور می‌دهند و در جهت دیگر در مقابل عبور جریان از خود مقاومت بالایی نشان می‌دهند. از لحاظ الکتریکی یک دیود هنگامی جریان را از خود عبور می دهد که ولتاژ مثبت به آند و منفی به کاتد متصل شود. مقدار ولتاژی که باعث می‌شود تا دیود شروع به هدایت جریان الکتریکی نماید ولتاژ آستانه یا forward) voltage drop) نامیده می‌شود که با توجه به نوع دیود حدود ۰.۳ تا ۰.۷ ولت می‌باشد. دیود که از به هم چسباندن دو ماده نیمه هادی n و p هر دو از یک جنس، (سیلیسیم یا ژرمانیم) ساخته می‌شود که نیمه هادی نوع p دارای بار الکتریکی مثبت (کمبود الکترون) و کریستال نیمه هادی n دارای بار الکتریکی منفی (الکترون اضافی) می باشد. در شکل زیر ساختار و نماد مداری دیود نشان داده شده است. این نماد نشان میدهد جریان در جهت مثلث عبور میکند و خط سمت راست در نماد نشان دهنده سر منفی آن است. به این نکته توجه داشته باشید که جهت جریان الکتریکی با جهت حرکت الکترون‌ها یکسان نیست. جهت جریان الکتریکی به صورت قراردادی، جهت حرکت بارهای مثبت در نظر گرفته می‌شود. در صورتی‌که، الکترون‌ها در خلاف جهت بارهای مثبت در مدار الکتریکی حرکت می‌کنند. به سمت چپ دیود، آند و به سمت راست آن کاتد گفته می‌شود.

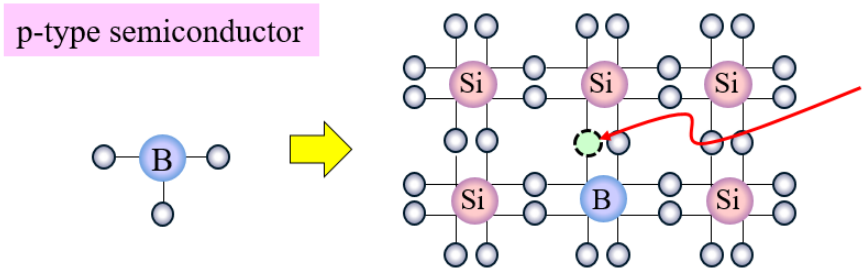


ساختار و نماد دیود

آند از نیمه‌رسانای نوع p و کاتد از نیمه‌رسانای نوع n تشکیل شده است.

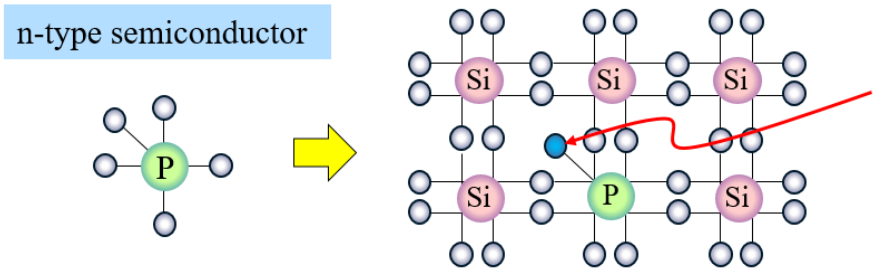
نیمه‌رسانای نوع P

فرض کنید یکی از سه عنصر گالیوم، بور یا آلومینیوم به ساختار کریستالی سیلیکون اضافه می‌شوند. از آنجا که هر یک از این اتم‌ها، سه الکترون در بیرونی‌ترین لایه خود دارند، هر یک از سه الکترون با اتم‌های مجاور به اشتراک گذاشته می‌شوند. همان‌طور که دیده می‌شود، پس از اشتراک الکترون‌های اتم‌های مجاور با یکدیگر، یک حفره در بیرونی‌ترین لایه باقی می‌ماند. به دلیل وجود این حفره می‌توانیم بگوییم حفره در ساختار سیلیکون ایجاد می‌شود که پذیرنده الکترون است. در واقع به علت کمبود الکترون پلاریته نهایی مثبت خواهد شد. در شکل زیر ساختار مولوکولی سیلیکون بعد از اضافه کردن بور نشان داده شده است.



نیمه‌رسانای نوع N

با افزودن اتم‌ها پنج ظرفیتی یا اتم‌هایی با ۵ الکترون در لایه خارجی خود به سیلیکون، نیمه‌رسانای نوع n تشکیل می‌شود. آرسنیک، آنتیموان و فسفر مهم‌ترین مثال‌ها اتم‌های پنج ظرفیتی هستند. هر گاه یکی از اتم‌های پنج ظرفیتی به ساختار کریستالی سیلیکون اضافه می‌شوند، چهار الکترون از پنج الکترون لایه خارجی با اتم‌های همسایه به اشتراک گذاشته می‌شوند. اما هنوز یک الکترون در لایه خارجی باقی مانده است. این الکترون باقی‌مانده همانند الکترونی آزاد رفتار و آزادانه به اطراف حرکت می‌کند. پلاریته نهایی منفی خواهد شد. در شکل زیر ساختار مولوکولی سیلیکون بعد از اضافه کردن فسفر به آن نشان داده شده است.

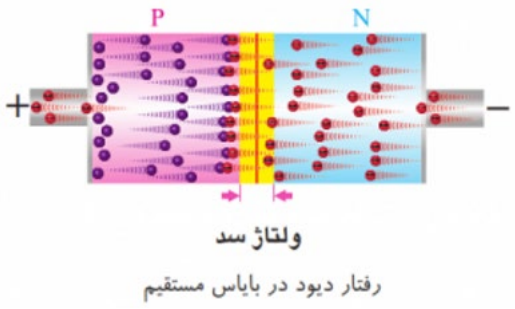


دیود در بایاس مستقیم و معکوس

اصطلاح بایاسینگ را برای راه اندازی و آماده به کار کردن یک مجموعه به کار می برند. در این قسمت منظور از بایاسینگ دیود وصل کردن ولتاژ خارجی به آن می باشد.

بایاس مستقیم (Forward Bias) : اگر نیمه هادی نوع P را به قطب مثبت باتری و نیمه هادی نوع N را به قطب منفی آن متصل کنیم، این حالت را بایاس مستقیم گویند.

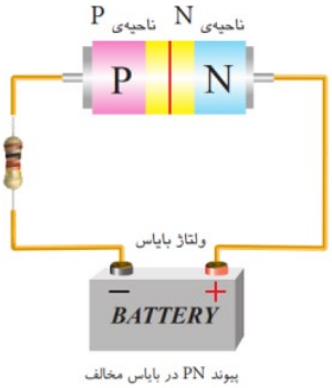
پیوند PN در بایاس موافق



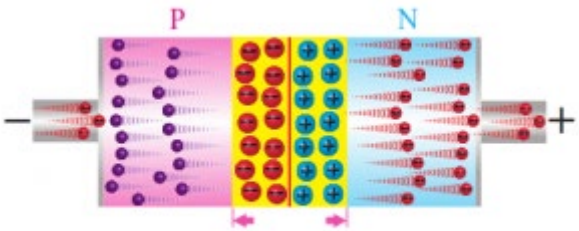
رفتار دیود در بایاس مستقیم

اگر در این بایاس ولتاژ باتری بیشتر از پتانسیل سد (پتانسیل محل اتصال دو نیمه هادی) باشد، میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ باتری، میدان الکتریکی پتانسیل سد دیود را خنثی می کند (زیرا جهت میدان باتری، عکس میدان پتانسیل سد است). منطقه تخلیه و پتانسیل سد از بین می رود و به عبارت دیگر لایه سد، در اثر میدان الکتریکی ولتاژ باتری می شکند. ولتاژ مورد نیاز بسته به نوع دیود متفاوت است اما برای دیود های معمولی حدود ۰.۷ است. در نتیجه الکترون های آزاد واقع در کریستال N از ناحیه سد عبور کرده و سپس از کریستال نوع P عبور کرده و جذب قطب مثبت باتری می شوند. همین طور نیز حفره های واقع در کریستال نوع P از ناحیه سد عبور کرده و از کریستال نوع N می گذرند و به طرف قطب منفی باتری می روند. به این ترتیب در مدار جریان برقرار می شود.

بایاس معکوس (Reverse Bias) : در صورتی که نیمه هادی نوع P را به قطب منفی باتری و نیمه هادی نوع N را به قطب مثبت آن وصل کنیم، این حالت را بایاس معکوس می نامند. در این شرایط الکترون های آزاد واقع در نیمه هادی نوع N ، به سبب پتانسیل مثبت باتری، به سمت راست و حفره ها نیز به دلیل پتانسیل منفی باتری، به سمت چپ کشیده می شوند. در این حالت عرض ناحیه سد (تخلیه) زیادتر می گردد و ولتاژ باتری، پتانسیل سد را تشدید می کند. لذا به دلیل افزایش پتانسیل سد و تهی تر شدن ناحیه ی از الکترون ها و حفره ها، جریانی در مدار برقرار نخواهد شد.



پیوند PN در بایاس مخالف

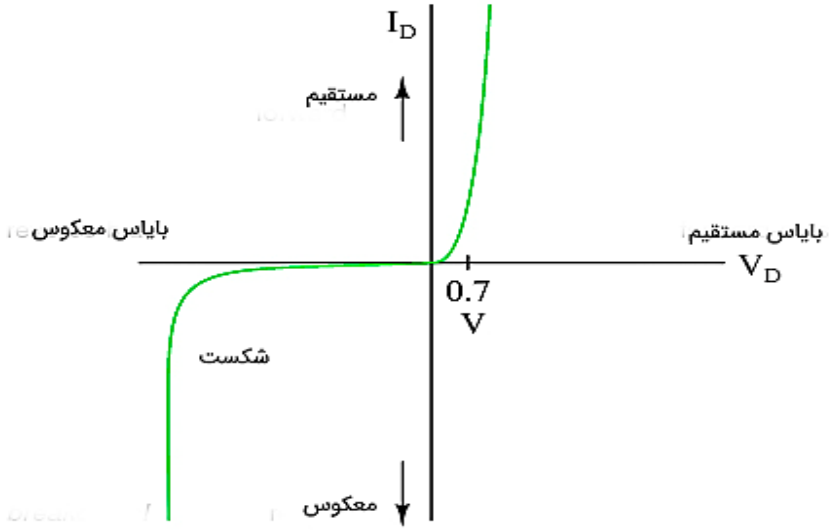


بایاس معکوس (مخالف)

جریان اشباع معکوس در دیود: به خاطر داشته باشیم که همواره بر اثر گرما، پیوند ها در حال شکسته شدن و ترکیب مجدد هستند. حال اگر دیودی در بایاس معکوس بسته شود و تعدادی از پیوند ها در لایه سد شکسته شوند، چه اتفاقی می افتد؟ با توجه به شکل زیر فرض می کنیم یک پیوند در محل سد شکسته شده باشد، در نتیجه یک الکترون آزاد و یک حفره به وجود می آید. الکترون آزاد به سمت پتانسیل مثبت باتری کشیده می شود و جذب قطب مثبت باتری می شود و می توانیم بگوییم که حفره، جذب قطب منفی گردیده است، لذا در مدار، جریان بسیار ضعیفی به وجود می آید که به جریان اشباع معکوس معروف است. مقدار این جریان به جنس نیمه هادی و گرمای محیط بستگی دارد، زیرا این جریان فقط در اثر شکسته شدن پیوند ها ایجاد می شود. مقدار این جریان بسیار کم است و از نانو آمپر تجاوز نمی کند.

منحنی مشخصه ی ولت-آمپر دیود

در این قسمت می خواهیم منحنی مشخصه ی دیود را بررسی کنیم، یعنی می خواهیم ببینیم که با تغییر ولتاژ دوسر دیود در حالات مختلف، جریان آن چه تغییری می کند. در شکل زیر منحنی مشخصه دیود را مشاهده می کنید:

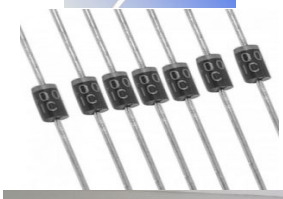
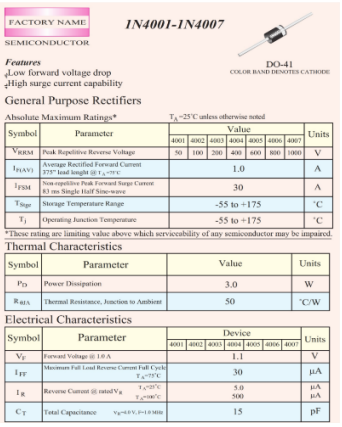
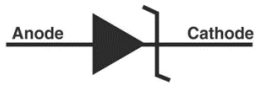
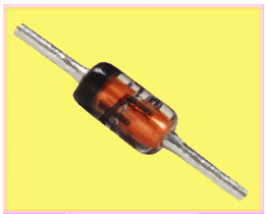


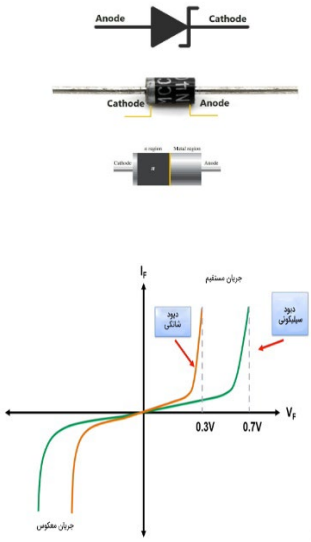
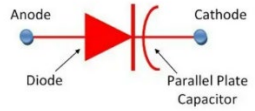
به ولتاژ ۰/۷ ولتاژ زانو (Knee Voltage) نیز گفته میشود. ولتاژ زانو مقدار ولتاژ کمینه‌ای است که پس از آن جریان عبوری از دیود در بایاس مستقیم به صورت قابل‌ملاحظه‌ای با افزایش ولتاژ افزایش می‌یابد. همان‌طور که در نمودار بالا دیده می‌شود در بایاس مستقیم دیود با افزایش ولتاژ مقدار بسیار کمی جریان را از خود عبور می‌دهد. هنگامی که ولتاژ معکوس به دیود اعمال شود، هیچ اتفاق خاصی رخ نمی‌دهد، اما با رسیدن به ولتاژ شکست، مقدار قابل‌توجهی جریان از دیود در جهت عکس عبور می‌کند. ولتاژ شکست پارامتر مهمی است که توسط سازنده مشخص میشود. برای مثال در دیود معمولی 1n4007 ولتاژ شکست برابر با ۱۰۰۰ ولت است.

انواع دیود ها

با توجه به کاربرد و ساختمان داخلی دیودها انواع مختلفی وجود دارد که در جدول زیر دسته بندی شده اند.

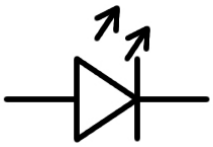
جدول انواع دیود

نوع دیود	توضیحات	شکل
دیود یکسو کننده معمولی **Rectifiers Diode**	این دیود ها برای یکسوسازی یا یک طرفه کردن ولتاژ های متناوب به کار می روند در محدوده فرکانس کاری ۵۰ تا ۶۰ هرتز ساخته می شوند. دیودهای معمولی سیلیکونی در بایاس مستقیم و به ازای ولتاژهای کمتر از ۰٫۵ ولت جریانی را از خود عبور نمی دهند. اگر ولتاژ بایاس بین ۰٫۵ تا حدود ۰٫۶۵ ولت شود، جریان ضعیفی در دیود برقرار می شود و اگر ولتاژ بایاس بیشتر از این مقدار شود جریان دیود به طور ناگهانی افزایش می یابد. بنابراین ولتاژ آستانه هدایت دیود معمولی سیلیسیمی حدود ۰٫۶۵ ولت می باشد. دیودهای معمولی ژرمانیومی دارای ولتاژ آستانه هدایت ۰٫۲ ولت می باشند . این دیودها در بایاس مستقیم، به ازای ولتاژ بایاس کمتر از ۰٫۱ ولت جریانی را از خود عبور نمی دهند و اگر ولتاژ بایاس بین ۰٫۱ تا ۰٫۲ ولت شود، جریان ضعیفی در دیود برقرار می شود و در صورتی که مقدار ولتاژ بایاس از ۰٫۲ ولت بیشتر شود، جریان دیود به طور ناگهانی افزایش می یابد. دیودهای سری 1N400X یکی از پرکاربردترین دیودهای معمولی در مدارات الکترونیکی می باشند و کاربرد های مختلفی را در حوزه کاری خود انجام می دهند. این دیود ها در ۷ مدل می باشند که مقدار X برای هر مدل متفاوت می باشد. در جدول زیر برای هر سری مقادیر حد در این دیود ها را مشاهده می کنید. علاوه بر آن ها مقدار توان حداکثر دیود ها و دمای کاری مجاز آن را مشاهده می کنید. همچنین مقدار خازن در محل پیوند PN نیز ذکر شده که برابر 15pF می باشد.	  
دیود زنر **Zener Diode**	دیود زنر هم مانند دیود معمولی از اتصال دو کریستال P و N ساخته می شود. جنس نیمه هادی های این دیود از سیلیسیم بوده و در بایاس موافق مانند یک دیود معمولی سیلیسیمی عمل می کند. بر خلاف دیود های معمولی که در بایاس مخالف، در منطقه شکست آسیب می بینند، دیودهای زنر به گونه ای ساخته می شوند تا بتوانند در منطقه شکست کار کنند. وقتی ولتاژ بایاس مخالف دیود زنر را به تدریج افزایش دهیم، در یک ولتاژ خاص دیود شروع به هدایت می کند. ولتاژی که دیود زنر به ازای آن در بایاس معکوس هادی می شود به ولتاژ شکست زنر معروف است. در کارخانه های سازنده دیود زنر، با تنظیم میزان ناخالصی در این دیودها، دیودهایی با ولتاژهای شکست مختلف ساخته می شوند. با هادی شدن دیود در ولتاژ شکست دیود، ولتاژ دو سر دیود تقریباً ثابت می ماند و جریان عبوری از دیود افزایش می یابد. از این خاصیت دیود زنر برای تثبیت ولتاژ استفاده می شود. ولتاژ زنر معمولاً از ۲/۴ ولت تا ۲۰۰ ولت ساخته می شود. دیود های زنر معمولاً برای توان های ۰/۱۵ وات تا ۵۰ وات ساخته می شوند. در شکل یک نمونه دیود زنر توان پایین و دیود زنر توان بالا نمایش داده شده است.	 

دیود اتصال نقطه‌ای Point Contact Diode	دیود های معمولی در بایاس معکوس، یک ظرفیت خازنی در حدود PFرا ایجاد می کنند. اگر بخواهیم این دیود ها را در فرکانس های بالا به کار ببریم، به دلیل ظرفیت خازنی در بایاس معکوس، جریان از مدار عبور می کند. زیرا در فرکانس بالا مقاومت معکوس دیود، کم می شود. از این رو باید ظرفیت خازنی دیودهایی را که در فرکانس بالا به کار می روند کم نمود. برای کم کردن ظرفیت خازن، ساده ترین روش کم کردن سطح اتصال هادی ها است. لذا اتصال دیود های اتصال نقطه ای را برای فرکانس های بالا و جریان های کم می سازند. علت این نامگذاری به روش ساخت آن برمیگردد. در شکل زیر یک دیود اتصال نقطه ای 1N4148 را مشاهده می کنید.	
دیود شاتکی Schottky	دیود های معمولی نمی توانند خیلی سریع قطع و وصل شوند. برای بالا بردن سرعت قطع و وصل در یک دیود برای مثال با فرکانس ۱ مگاهرتز از دیود شاتکی استفاده می شود. این دیود، دیودی است که افت ولتاژ مستقیم پایین‌تری را در مقایسه با دیودهای اتصال p-n سیلیکون عادی دارد. افت ولتاژ، ممکن است جایی میان ۰٫۱۵ و ۰٫۴ ولت، در جریان‌های پایین در مقایسه با ۰٫۶ ولت برای یک دیود سیلیکونی باشد. افت ولتاژ پایین‌تر، به دیود کمک می‌کند که از وضعیت رسانایی به وضعیت نارسانایی در زمان کوتاهتری، انتقال یابد. برای حصول این کارایی، این دیودها، به روشی غیر از دیودهای نرمال، با اتصال فلز به نیمه رسانا، ساخته می‌شوند. این دیود ها که به دیود های fast هم معروف اند کاربرد فراوانی در منابع تغذیه سویچینگ و مبدلهای قدرت دارند. HER30X و MR85X نمونه های دیود fast موجود در بازار است.	
دیود خازنی (واراکتور)	دیود خازنی، مانند یک دیود معمولی است. اگر دو نیمه هادی P و N را به عنوان دو هادی و لایه ی سد را به عنوان عایق به حساب بیاوریم، این مجموعه عملا یک خازن است که مقدار این خازن در منطقه تخلیه حدود پیکو فاراد است. چون این ظرفیت خازنی نتیجه ی لایه ی سد در دیود است، این دیود باید همیشه در بایاس معکوس به کار گرفته شود تا بتوان از اثر خازنی این دیود استفاده نمود. این دیود های خازنی اندکی با دیود های معمولی تفاوت دارد. اول این که جریان اشباع معکوس آن فوق العاده کم است، دوم این که سطح دو نیمه هادی را طوری انتخاب می کنند که حداکثر بتواند خازنی با ظرفیت ۲٫۵ نانو فاراد را ایجاد کند. کاربرد این دیود ها در مدارات اسیلاتور در تلویزیون ها و رادیود ها می باشد و می تواند در مدار تیونر رادیو استفاده شود.	 
دیود تونلی Tunnel Diode	اگر یک دیود نیمه‌رسانا توسط ناخالصی‌ها آلاییده (Doped) شود، مقاومتی منفی را از خود نشان خواهد داد. مقاومت منفی به این معنی است که با افزایش ولتاژ، جریان عبوری از دیود کاهش می‌یابد. دیودهای تونلی به عنوان ادوات کلیدزنی بسیار سریع در کامپیوترها به کار می‌روند. همچنین از این دیودها در نوسان‌سازهای فرکانس بالا و تقویت‌کننده‌ها استفاده می‌شود.	

دیود LED

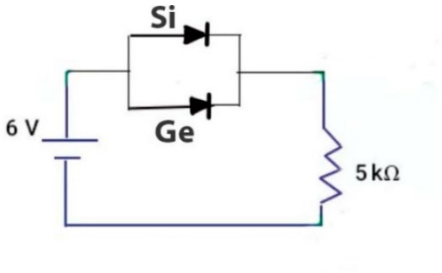
دیودهای منتشرکننده نور Light emitting diodes شبیه دیودهای معمولی هستند اما هرگاه الکترون با حفره بازترکیب شود، نور ساطع می‌شود. در ترکیب الکترون با حفره، الکترون از نوار رسانش به نوار ظرفیت و از سطح انرژی بیشتر به سطح انرژی کمتر می‌آید. هرگاه الکترونی از سطح انرژی بیشتر به سطح انرژی کمتر بیاید، تفاوت انرژی به شکل فوتونی با انرژی برابر تفاوت انرژی دو سطح آزاد می‌شود. بنابراین، هرگاه بازترکیبی بین الکترون و حفره رخ می‌دهد، نور ایجاد می‌شود. از آنجا که بازترکیب الکترون و حفره بیشتر در نزدیکی محل اتصال PN رخ می‌دهد، بیشتر نور از این ناحیه ساطع خواهد شد. دیود معمولی نیز پس از قرار گرفتن در مدار از خود نور ساطع می‌کند، اما نور ساطع شده، نور مریی نیست. اگر اندازه انرژی گاف در ماده نیمه‌رسانا زیاد باشد، فرکانس نور تابیده شده نیز زیاد خواهد بود. فرکانس بالا در محدوده نور آبی و بنفش قرار می‌گیرد. در مقابل، اگر انرژی گاف کوچک باشد، فرکانس نور تابیده شده نیز کوچک و در محدوده نور قرمز و فروسرخ است. انرژی گاف سیلیکون و ژرمانیوم کم است. به همین‌دلیل، از این دو نیمه‌رسانا در ساخت LED استفاده نمی‌شود و از ترکیبهای دیگر برای ساخت LED استفاده میشود. در شکل زیر این نوع دیود و نماد مداری آن نشان داده شده است.



مقدار ولتاژ فورورد حدودی مورد نیاز برای رنگ های مختلف LED به صورت زیر است. اطلاعات دقیق تر باید از دیتا شیت خوانده شود.

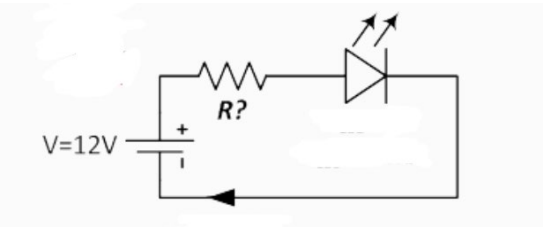
LED سبز 2.2 ولت ❋ LED آبی 3.3 ولت ❋ LED نارنجی 2.0 ولت ❋ LED زرد 2.1 ولت ❋ LED سفید 3.3 ولت
LED مادون قرمز 1.5 ولت ❋ LED فرا بنفش 3.3 ولت

مثال۱: الف) در مدار زیر جریان مقاومت چقدر است؟ ب) اگر دیود سیلیکونی برعکس شوند چه مقدار جریان از مقاومت عبور میکند؟ ج) اگر دیود ژرمانیوم برعکس شوند چه مقدار جریان از مقاومت عبور میکند؟ د) اگر هر دو دیود برعکس شوند چه مقدار جریان از مقاومت عبور میکند؟



راهنمایی اول دیود ژرمانیوم روشن میشود

مثال ۲: اگر جریان لازم برای روشن کردن یک LED سبز رنگ ۳۰ میلی آمپر باشد، برای روشن کردن آن با یک باتری ۱۲ ولتی مطابق مدار زیر چه مقدار مقاومت باید با آن به صورت سری متصل کنیم؟

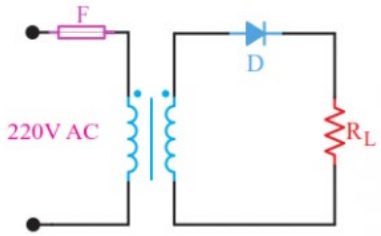


یکسو سازی توسط دیود

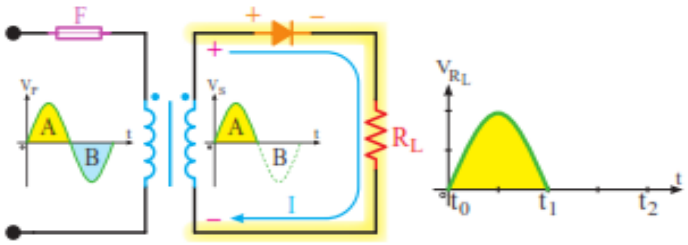
مدار های یکسو کننده ی دیودی، مداراتی هستند که ولتاژ متناوب را به ولتاژ مستقیم تبدیل می نمایند. عنصر اصلی این مدار ها دیود است. زیرا همان طور که خواندیم دیود در یک جهت هدایت می کند در حالی که در جهت دیگر قطع است. مدارات یکسوکننده علاوه بر یکسو سازی برق یکفاز ، برق چند فازه را نیز یکسو می کنند. ابتدا یکسو ساز نیم موج و سپس تمام موج بررسی میشود.

- ❖ مدار یکسو کننده ی نیم موج

مدار یکسو کننده ی نیم موج به صورت شکل زیر می باشد:



در این مدار فرض می شود که دیود های به کار رفته شده ایده آل هستند؛ یعنی هیچ افت ولتاژی در دوسر آن ها وجود ندارد. طرز کار مدار فوق بدین صورت است که در نیم سیکل اول چون ولتاژ آند از کاتد مثبت تر است دیود روشن شده و جریان از دیود عبور می کند. پس دیود مانند کلید بسته عمل می کند و ولتاژ بار همان ولتاژ منبع می باشد. اما در نیم سیکل منفی چون ولتاژ آند از کاتد منفی تر است دیود خاموش است و دیود مانند کلید باز عمل کرده و ولتاژ بار صفر می باشد.

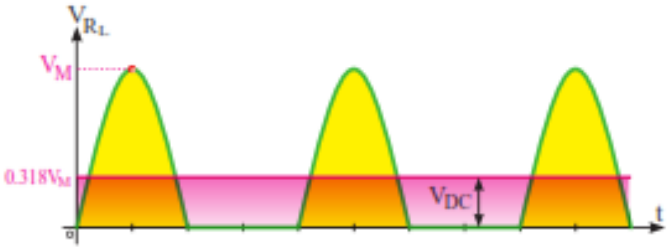


سوال) اگر ولت متر DC را به بار وصل کنیم چه ولتاژی را نشان می دهد؟

همان طور که می دانیم، ولت متر DC مقدار ولتاژ متوسط را و ولت متر AC مقدار ولتاژ موثر را نشان می دهد. چون در این مدار نوع ولتاژ مستقیم (یک طرفه) است پس ولت متر مقدار ولتاژ متوسط را نشان می دهد. مقدار متوسط ولتاژ در این حالت (ولتاژ یکسو شده نیم موج) برابر است با:

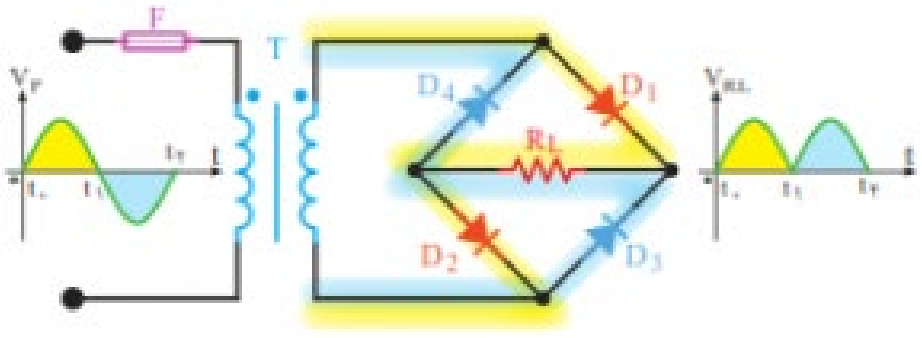
$$Vdc = Vm/\pi = 0.318Vm$$

مقدار ولتاژ متوسط (DC) بر روی شکل زیر نشان داده شده است.

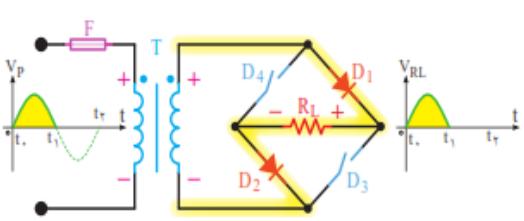


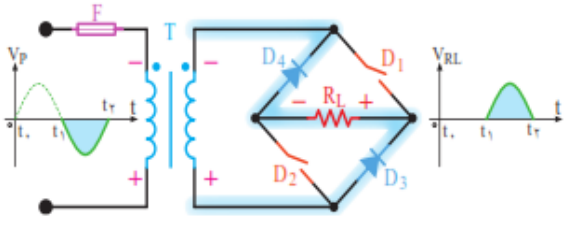
❖ یکسو کننده ی تمام موج پل

مدار یکسو کننده پل به صورت شکل زیر می باشد. در این مدار از ۴ دیود استفاده شده است.



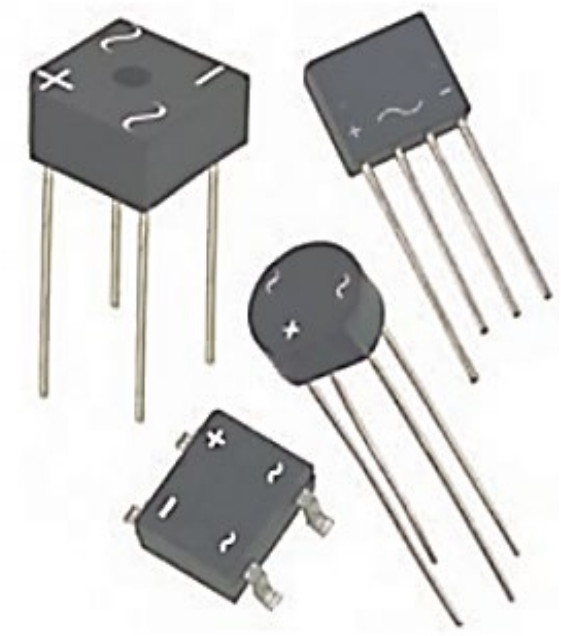
طرز کار مدار به این صورت است که در مدت نیم سیکل مثبت، دیود های D1 و D2 در بایاس مستقیم و دیود های D3 و D4 در بایاس معکوس قرار دارند. بنابراین، جریان از دیود های D1 و RL و D2 مسیر خود را می بندند. با توجه به این که دیود ها ایده آل فرض شده اند، لذا تمام ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور دو سر بار ظاهر می گردد. در مدت نیم سیکل منفی، با توجه به شکل زیر دیود های D3 و D4 در بایاس موافق و دیود های D1 و D2در بایاس معکوس قرار دارند. لذا، جریان از طریق دیود های D3 و D4 و بار RL مسیر خود را می بنند. در این حالت نیز تمام ولتاژ در دوسر بار ظاهر می گردد.





مقدار متوسط ولتاژ خروجی یکسو ساز تمام موج $0.636Vm$ می باشد.

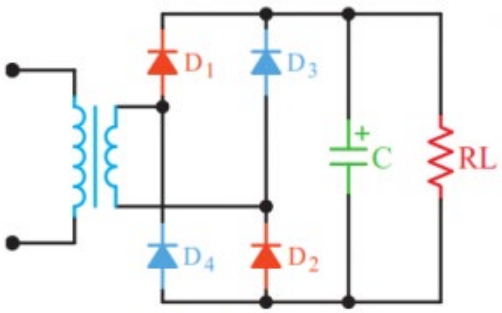
معمولا در بازار به جای چهار دیود در این مدار از پل دیود استفاده می شود که در آن ۴ دیود قرار دارد. در شکل زیر نمونه ای از آن ها را مشاهده می کنید .



❖ مدار یکسو ساز با صافی خازنی

همان طور که دیدیم، توسط دیود ها می توان ولتاژ متناوب را به ولتاژ یک طرفه (DC) تبدیل نمود، اما این ولتاژ یک سو شده دارای نوسان هایی است (با فرکانس ۱۰۰ هرتز در یکسو کننده تمام موج و ۵۰ هرتز در یکسو کننده نیم موج). در الکترونیک و بیشتر مبحث راه اندازی و تغذیه مدارات الکترونیکی و مبحث مدارات کنترل و دیجیتال به یک ولتاژ ثابت نیاز داریم. برای این که بتوانیم ولتاژ نوسان دار را به یک ولتاژ ثابت تبدیل کنیم، باید از المان هایی استفاده کنیم که بتوانند انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کنند و موقعی که ولتاژ یک سو شده از مقدار Vm به مقدار صفر میل می کند، این المان، انرژی ذخیره شده را به مصرف کننده بدهد. این المان ها سلف و خازن می باشند.

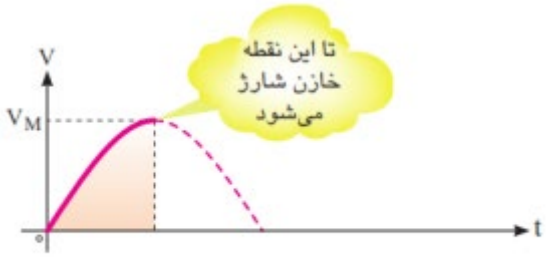
صافی خازنی: زمانی که خازن به صورت صافی به کار می رود، به طور موازی با بار قرار می گیرد.



مدار یک‌سو ساز پل با صافی خازنی

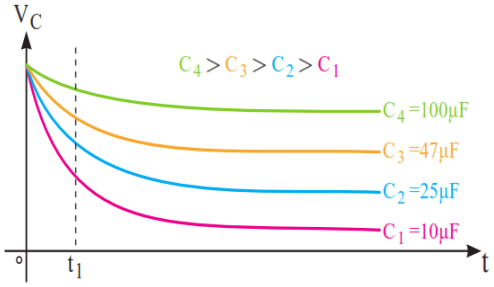
چگونگی صاف شدن ولتاژ، به این صورت است که ابتدا از مقدار صفر تا ماکزیمم ولتاژ نیم سیکل مثبت، مطابق شکل زیر در خازن ولتاژ ذخیره می گردد.

شکل ولتاژ یک‌سو شده تمام موج



نحوه‌ی شارژ خازن در صافی خازنی

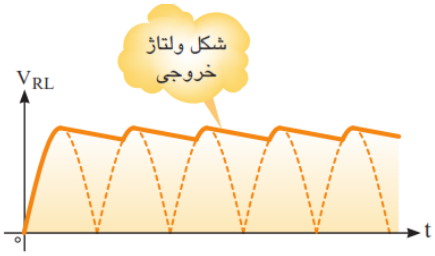
زمانی که ولتاژ خروجی از مقدار Vm کم تر می شود، دیود های یکسو کننده در بایاس معکوس قرار می گیرند. بنابراین ولتاژ دو سر بار از خازن تامین می گردد. به عبارت دیگر ، خارن از طریق بار دشارژ می گردد. همان طور که می دانیم، منحنی دشارژ خازن به صورت نمایی نزولی است. این شیب نزول به مقدار بار و ظرفیت خازن بستگی دارد. در شکل زیر منحنی دشارژ خازن برای چهار نوع ظرفیت خازن با بار مساوی رسم شده است.



اثر ظرفیت خازن روی منحنی دشارژ خازن

منحنی شارژ و دشارژ خازن در بار

در شکل زیر اثر تغییر ظرفیت را در ولتاژ ریپل نمایش داده شده است.



ظرفیت خازن زیاد

ظرفیت خازن کم

از فرمول تقریبی زیر باری محاسبه ظرفیت خازن میتوان استافاده کرد:

$$C = I_{LOAD}/(f*V_R)$$

C : مقدار خازن برحسب فاراد

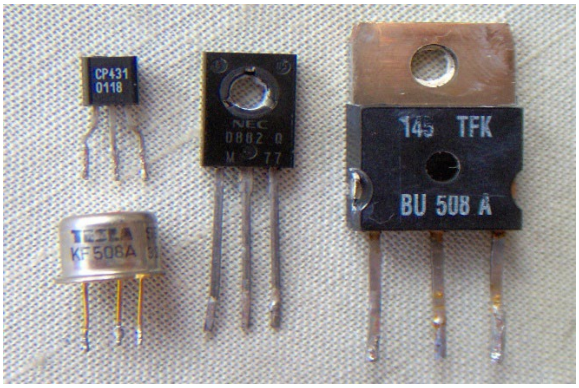
I_{load} : جریان مصرفی برحسب امپر

f : فرکانس بر حسب هرتز

V_R : مقدار ولتاژ ریپل قابل قبول بر حسب ولت

ترانزیستور Transistor

یکی دیگر از قطعات پر کاربرد در الکترونیک و تقریبا مهمترین آنها، ترانزیستور است. ترانزیستورها دنیای الکترونیک را احاطه کرده‌اند. حضور این قطعات الکترونیکی تقریباً در هر مدار مدرنی به عنوان یک قطعه کنترل حیاتی است. گاهی این قطعات را می‌توان روی بردهای الکترونیکی مشاهده کرد، اما امروزه اغلب در یک مدار مجتمع به کار رفته‌اند و از چشم ما پنهان هستند ترانزیستور به عنوان سوییچ، تقویت کننده، تثبیت کننده ولتاژ و نوسان ساز و ... در مدار های الکترونیکی کاربرد دارد.



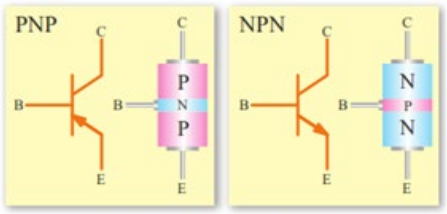
دو دسته اصلی ترانزیستورها، ترانزیستور دوقطبی پیوندی (Bipolar Junction Transistors, BJT) و ترانزیستور اثرِ میدان (Field Effect Transistors, FET) هستند. ترانزیستورهای اثر میدان، خود به دو دسته ترانزیستور پیوند اثر میدانی (JFET) و ترانزیستور اثر میدان نیمه‌هادیِ اکسید-فلز (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET) که به اختصار به آن ماس‌فت گفته می‌شود، تقسیم می‌شوند.

که در این بخش ترانزیستور های BJT را بررسی می کنیم. ترانزیستور معمولی، یک المان سه پایه است که از سه کریستال نیمه هادی نوع N و P، که در کنار یکدیگر قرار میگیرند، تشکیل شده است. ترتیب قرار گرفتن نیمه هادی ها در کنار هم، به دو صورت انجام پذیر است:

الف) دو قطعه نیمه هادی نوع N در دوطرف و نیمه هادی نوع P در وسط.

ب) دو قطعه نیمه هادی نوع P در دوطرف و نیمه هادی نوع N در وسط.

در حالت (الف) ترانزیستور را NPN و در حالت (ب) ترانزیستور را PNP می نامند. شکل زیر ترتیب قرار گیری کریستال ها را کنار هم نشان می دهد :



علامت قراردادی ترانزیستورهای
NPN و PNP

پایه های خروجی ترانزیستور را به ترتیب امیتر(منتشر کننده =Emitter) بیس (پایه = Base) و کلکتور (جمع کننده =collector) نام گذاری کرده اند. امیتر را با حرف E ، بیس را با حرف B و کلکتور را با حرف C نشان می دهند. نیمه هادی نوع P یا N که به عنوان امیتر به کار می رود، نسبت به لایه ی بیس و کلتکتور، ناخالصی بیشتری دارد. ضخامت این لایه حدود چند ده میکرون است (عملا حدود ۲۰-۲۰۰۰ میکرومتر) و سطح تماس آن نیز به میزان فرکانس و قدرت ترانزیستور بستگی دارد. لایه ی بیس، نسبت به کلکتور و امیتر، ناخالصی کم تری دارد و ضخامت آن نیز به مراتب از امیتر و کلکتور کم تر است و عملا از حدود چند میکرون تجاوز نمی کند.

ناخالصی لایه ی کلکتور از امیتر کمتر و از بیس بیش تر است. ضخامت این لایه به مراتب از امیتر بزرگتر است، زیرا تقریبا تمامی تلفات حرارتی ترانزیستور در کلکتور ایجاد می شود. شکل زیر تصویری از نسبت تقریبی لایه ها را نشان می دهد. سطح تماس کلکتور با بیس ، حدود ۹ برابر سطح تماس امیتر با بیس است.

این نوع ترانزیستور ها را به اختصار Bipolar (Junction Transistor BJT) می نامند. عبارت Bipolar یا دوقطبی، از عملکرد الکترون ها و حفره ها که حامل های جریان هستند ، ناشی می شود. در واقع این ترانزیستور ها با جریان کنترل می شوند که در ادامه با این مفهوم بیشتر آشنا می شویم.

عملکرد ترانزیستور

برخلاف مقاومت‌ها، که رابطه بین ولتاژ و جریان آن‌ها خطی است، ترانزیستورها قطعاتی غیرخطی هستند. در واقع، ترانزیستورها چهار حالت یا ناحیه عملکرد مشخص دارند که جریان عبوری از آن‌ها را توصیف می‌کند.

(هنگامی که در مورد جریان گذرنده از ترانزیستور صحبت می‌کنیم، معمولاً منظورمان جریان از کلکتور به امیتر ترانزیستور NPN است.)

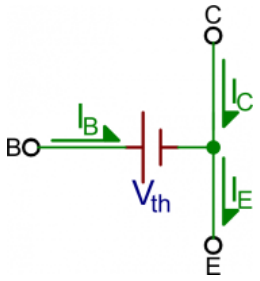
حالتهای مختلف عملکرد به صورت زیر است:

- **اشباع (Saturation)** ترانزیستور در این ناحیه مانند یک اتصال کوتاه عمل می‌کند و جریان آزادانه از کلکتور به امیتر برقرار است.
- **قطع (Cut-off)** در این ناحیه عملکرد، ترانزیستور مانند یک مدار باز عمل می‌کند و هیچ جریانی از کلکتور به امیتر عبور نمی‌کند.
- **فعال (Active)** جریان کلکتور به امیتر متناسب با جریانی است که به بیس وارد می‌شود.
- **فعال معکوس (Reverse-Active)** مانند حالت فعال، در این ناحیه نیز جریان متناسب با جریان بیس است، اما جهت جریان برعکس است؛ یعنی جریان از امیتر به کلکتور برقرار است (البته که ترانزیستور معمولاً برای کار در این ناحیه طراحی نشده است).

برای تعیین اینکه یک ترانزیستور در کدام ناحیه کاری قرار دارد، باید ولتاژهای موجود در هر سه پایه و نحوه ارتباط آن‌ها با یکدیگر را بررسی کنیم. ولتاژهای از بیس-امیتر (V_{BE}) و بیس-کلکتور (V_{BC}) حالت ترانزیستور را مشخص می‌کنند. تمرکز ما روی ترانزیستورهای NPN است. برای درک نحوه کار کردن ترانزیستورPNP ، کافی است پلاریته یا علائم $<$ و $>$ را برعکس کنید.

۱- حالت اشباع

اشباع حالت روشن یا وصل ترانزیستور است. ترانزیستور در حالت اشباع مانند یک اتصال کوتاه بین کلکتور و امیتر عمل می‌کند.



در حالت اشباع هر دو «دیود» موجود در ترانزیستور بایاس مستقیم هستند. این یعنی V_{BE} و همچنین V_{BC} باید بزرگ‌تر از صفر باشد. به عبارت دیگر، V_Bباید بزرگ‌تر از V_E و V_C باشد.

$$VB>VC$$

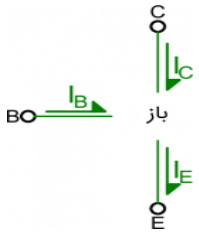
$$VB>VE$$

از آنجا که اتصال از بیس به امیتر دقیقاً مانند یک دیود به نظر می‌رسد، در واقع V_{BE} برای ورود به اشباع باید از یک «ولتاژ آستانه (Threshold Voltage) «بزرگ‌تر باشد. این ولتاژ با نمادهای مختلفی مانند V_{th} ، V_γو

V_dنشان داده می‌شود و مقدار واقعی آن برای ترانزیستورهای مختلف متفاوت است و حتی به دما نیز بستگی دارد. برای بسیاری از ترانزیستورها (در دمای اتاق) می‌توانیم این افت ولتاژ را تقریباً ۰٫۶ ولت در نظر بگیریم. واقعیت این است که هدایت کاملی بین امیتر و کلکتور وجود نخواهد داشت و بین این دو پایه اندکی افت ولتاژ ایجاد می‌شود. در دیتاشیت ترانزیستور، این ولتاژ به صورت ولتاژ اشباع CE و با نماد $V_{CE(sat)}$ تعریف می‌شود که همان ولتاژ لازم کلکتور-امیتر برای اشباع است. این مقدار معمولاً در حدود ۰٫۰۵ تا ۰٫۲ ولت است. در واقع، این ولتاژ نشان می‌دهد که V_C باید کمی بزرگ‌تر از V_E باشد تا ترانزیستور در حالت اشباع قرار گیرد (البته هنوز هم هر دو کوچک‌تر از V_B هستند).

۲- حالت قطع

ناحیه قطع در مقابل اشباع است. ترانزیستور در حالت قطع خاموش است و جریان کلکتور و بنابراین جریان امیتر وجود ندارد و تقریباً شبیه مدار باز است.



برای قرار دادن ترانزیستور در حالت قطع، ولتاژ بیس باید کمتر از ولتاژ امیتر و ولتاژ کلکتور باشد. این یعنی V_{BC}و V_{BE} هر دو باید منفی باشند.

$$VC>VB$$

$$VE>VB$$

در عمل، V_{BE}باید در مقداری بین ۰ ولت و V_{th} (۰٫۶ ولت) باشد تا به حالت قطع برسد.

۳- حالت فعال

برای کار در ناحیه فعال، V_{BE}ترانزیستور باید بزرگ‌تر از صفر و V_{BC} منفی باشد. بنابراین، ولتاژ بیس باید کوچک‌تر از ولتاژ کلکتور و بزرگ‌تر از ولتاژ امیتر باشد. این همچنین بدین معنی است که ولتاژ کلکتور باید بزرگتر از ولتاژ امیتر باشد.

$$VC>VB>VE$$

در واقع، برای «روشن کردن» ترانزیستور به افت ولتاژ غیرصفر مستقیم (به اختصار V_{th} ، V_γیا V_d) بیس به امیتر (V_{BE}) نیاز داریم. این افت ولتاژ معمولاً در حدود ۰٫۶ ولت است.

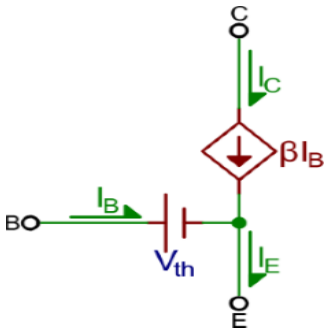
حالت فعال قوی‌ترین حالت ترانزیستور است، زیرا آن را به یک تقویت‌کننده (Amplifier) تبدیل می‌کند. جریان ورودی به پایه بیس، جریان ورودی به کلکتور و جریان خروجی امیتر را تقویت می‌کند. از نماد β برای نشان دادن «بهره» یا گین «Gain» (عامل تقویت‌کنندگی) یک ترانزیستور استفاده می‌کنیم (همچنین ممکن است

آن را با نمادهای β_F یا h_{FE} مشاهده کنیم). بهره β رابطه خطی بین جریان کلکتور (I_C) و جریان بیس (I_B) را بیان می‌کند:

$$I_C=\beta I_B$$

مقدار واقعی β برای ترانزیستورهای مختلف متفاوت است. مقدار آن معمولاً در حدود ۱۰۰ است، اما بسته به اینکه از چه ترانزیستوری استفاده می‌شود و چه میزان جریانی از آن عبور می کند، می‌تواند از ۵۰ تا ۲۰۰ و حتی ۲۰۰۰ نیز باشد. به عنوان مثال، اگر اندازه β ترانزیستور ۱۰۰ باشد، یعنی اینکه جریان ورودی ۱ میلی‌آمپر به بیس می‌تواند جریان کلکتور ۱۰۰ میلی‌آمپری را تولید کند.

شکل زیر مدل حالت فعال ترانزیستور را نشان می‌دهد که در آن، $I_C=\beta I_B$ و $V_{BE}=V_{th}$.



اما اندازه جریان امیتر (I_E) چقدر است؟ در حالت فعال، جریان‌های کلکتور و بیس وارد ترانزیستور می‌شوند و جریان امیتر خارج می‌شود. برای ارتباط جریان امیتر با جریان کلکتور، مقدار ثابت دیگری نیز داریم که به آن بهره جریان بیس مشترک (Common-base) می‌گوییم و آن را با α نشان می‌دهیم. این پارامتر، جریان‌های کلکتور و امیتر را به صورت زیر با هم مرتبط می‌کند:

$$I_C=\alpha I_E$$

مقدار α بسیار نزدیک به ۱ و البته کوچک‌تر از آن است. این بدین معنی است که در حالت فعال، I_C بسیار نزدیک به I_E و کوچک‌تر از آن است. مقدار β را می‌توان از α و بالعکس، به دست آورد:

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$
$$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1}$$

برای مثال، اگر β برابر با ۱۰۰ باشد، یعنی α برابر با ۰٫۹۹ است. در نتیجه، اگر I_C برابر با ۱۰۰ میلی‌آمپر باشد، یعنی I_E برابر با ۱۰۱ میلی‌آمپر است.

۴- حالت فعال معکوس

همان‌طور که ناحیه اشباع در برابر ناحیه قطع قرار می‌گیرد، حالت فعال معکوس برعکس حالت فعال است. ترانزیستور در حالت فعال معکوس هدایت و حتی تقویت می‌کند، اما جریان آن در جهت مخالف و از امیتر به

کلکتور است. نکته منفی در حالت فعال معکوس این است که β (در این حالت β_R) بسیار کوچک است. برای قرار دادن ترانزیستور در ناحیه فعال معکوس، ولتاژ امیتر باید بزرگ‌تر از ولتاژ بیس و ولتاژ بیس بزرگ‌تر از ولتاژ کلکتور بیشتر باشد $V_{BE}<0$ و $V_{BC}>0$

$$VC<VB<VE$$

حالت فعال معکوس معمولاً حالتی نیست که بخواهیم ترانزیستور در آن کار کند، اما دانستن آن لازم است.
جمع بندی در جدول زیر آورده شده است:

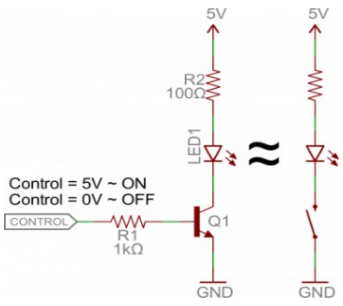
روابط ولتاژ	حالت NPN	حالت PNP
$V_E < V_B < V_C$	فعال	معکوس
$V_E < V_B > V_C$	اشباع	قطع
$V_E > V_B < V_C$	قطع	اشباع
$V_E > V_B > V_C$	معکوس	فعال

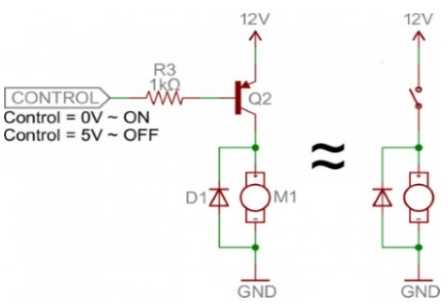
برخی از کاربرد های ترانزیستور

قابلیت ترانزیستور در تغییر بین دو حالت سبب می‌شود این قطعه دو کاربرد اساسی داشته باشد: سوئیچینگ و تقویت‌کنندگی. از ترانزیستورها در اندازه‌های کوچک و انواع گسسته، می‌توان برای ساخت سوئیچ‌های الکترونیکی ساده، منطق دیجیتال و مدارهای تقویت‌کننده سیگنال استفاده کرد. هزاران، میلیون‌ها و حتی میلیاردها ترانزیستور در کنار یکدیگر درون تراشه‌های کوچکی تعبیه می‌شوند و حافظه‌های رایانه، ریزپردازنده‌ها و سایر مدارهای مجتمع پیچیده را تشکیل می‌دهند.

۱- سوئیچینگ

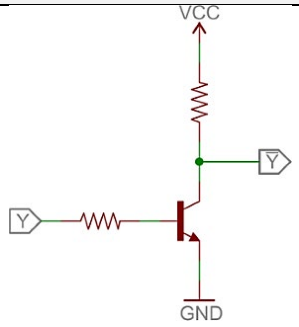
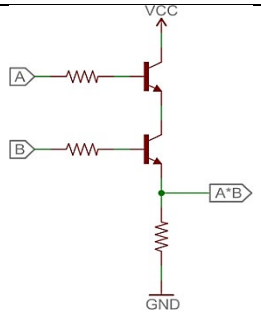
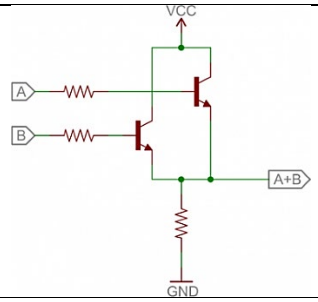
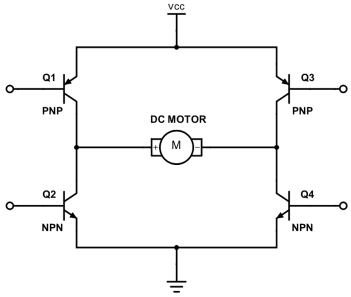
یکی از اساسی‌ترین کاربردهای ترانزیستور استفاده از آن برای کنترل جریان برق قسمت دیگری از مدار است. در واقع، در این موارد، ترانزیستور به عنوان یک سوئیچ الکتریکی به کار می‌رود. ترانزیستور در حالت قطع و یا اشباع می‌تواند نقش باینری خاموش و روشن سوئیچ را ایفا کند. در دو شکل زیر ترانزیستور شبیه کلید عمل میکند.





سوال) نقش مقاومت در مدار بیس چیست؟

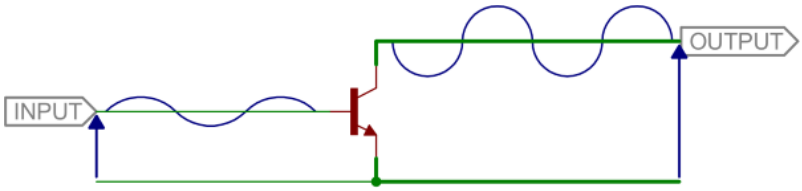
برخی از کاربرد سوئیچیگ ترانزیستورها

نام مدار	توضیح	شکل
گیت NOT	شکل روبرو مدار ترانزیستوری را نشان می‌دهد که یک معکوس‌کننده یا همان گیت NOT است. در اینجا یک ولتاژ بالا به بیس اعمال شده و BJT را روشن کده و کلکتور را به امیتر متصل می‌کند. از آنجا که امیتر مستقیماً به زمین متصل است، کلکتور نیز زمین خواهد شد (البته ولتاژ کمی بزرگ‌تر و در حدود ۰٫۰۵ تا ۰٫۲ ولت است). از طرف دیگر، اگر ورودی پایین باشد، ترانزیستور مانند یک مدار باز عمل کرده و اندازه ولتاژ خروجی V_{CC}خواهد شد.	
گیت AND	در اینجا یک جفت ترانزیستور وجود دارد که برای ساخت یک گیت AND دو ورودی از آن‌ها استفاده می‌شود. اگر هر یک از ترانزیستورها خاموش باشد، خروجی در کلکتور ترانزیستور دوم پایین می‌شود. اگر هر دو ترانزیستور روشن باشند (بیس هر دو بالا باشد)، خروجی مدار نیز بالا خواهد بود.	
گیت OR	شکل روبرو مدار گیت OR دو ورودی را نشان می‌دهد. در این مدار، اگر یکی از A یا B یا هر دو بالا باشد، ترانزیستور مربوطه روشن می‌شود و خروجی بالا را نتیجه خواهد داد. اگر هر دو ترانزیستور خاموش باشند، خروجی پایین می‌شود.	
پل H	پل اچ (H-Bridge) یک مدار مبتنی بر ترانزیستور است که قادر به کنترل حرکت موتورها هم در جهت عقربه‌های ساعت و هم در خلاف جهت عقربه‌های ساعت است. این مدار، یک ساختار بسیار محبوب است و نیروی محرکه تعداد بسیار زیادی از ربات‌ها را که باید بتوانند هم به جلو و هم به عقب حرکت کنند، کنترل می‌کند.	

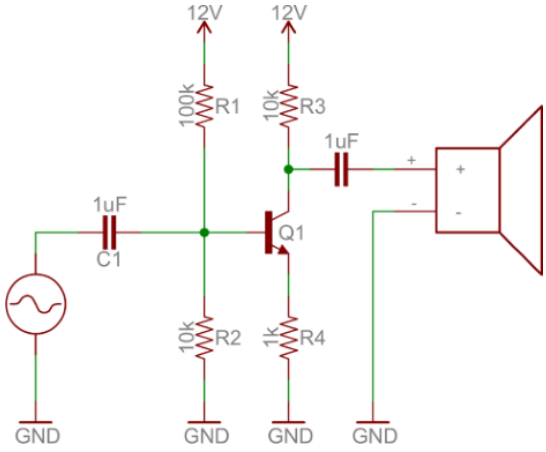
سوال) نحوه روشن شدن ترانزیستور ها برای تغییر جهت چرخش موتور را توضیح دهید.

۲- تقویت کنندگی

یکی از مهم‌ترین کاربردهای ترانزیستور تقویت، یعنی تبدیل سیگنال کم‌توان به سیگنالی با توان بالاتر است. تقویت‌کننده‌ها می‌توانند ولتاژ یا جریان را تقویت کنند. تقویت‌کننده‌هایی وجود دارند که جریان را می‌گیرند و ولتاژ بالاتری تولید می‌کنند یا بالعکس. در شکل زیر عمل تقویت کنندگی مشاهده میشود.

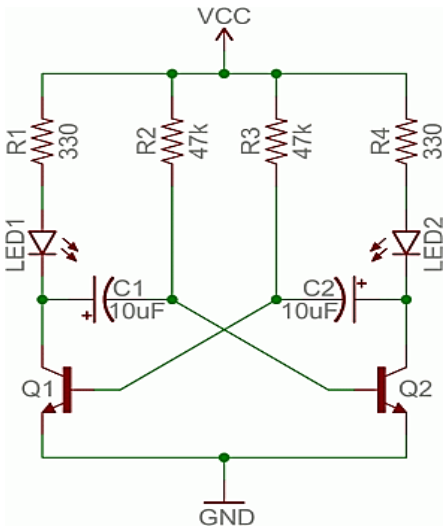


مدار امیتر مشترک به این دلیل محبوب است که برای تقویت ولتاژ به ویژه در فرکانس‌های پایین بسیار مناسب است. به عنوان مثال، برای تقویت سیگنال‌های صوتی گزینه بسیار مناسبی است. اگر یک سیگنال ورودی ۱/۵ پیک تا پیک کوچک دارید، می‌توانید با استفاده از یک مدار کمی پیچیده‌تر، مانند شکل زیر، ولتاژ را به خوبی تقویت کنید.



۳- اسیلاتور

اسیلاتور مداری است که سیگنال متناوبی تولید می‌کند که بین ولتاژ بالا و پایین نوسان می‌کند. اسیلاتورها در انواع مدارها و کاربردها از قبیل چشمک زدن ساده LED تا تولید سیگنال ساعت برای کنترل میکروکنترلر مورد استفاده قرار می‌گیرند. اسیلاتورها برای تولید سیگنال نوسانی از روش‌های مختلفی استفادع می‌کنند که ترانزیستوری یکی از آن‌ها است.



علاوه بر دو ترانزیستور، خازن‌ها قطعات مهم این مدار هستند. خازن‌ها به طور متناوب شارژ و تخلیه می‌شوند که باعث می‌شود دو ترانزیستور به طور متناوب روشن و خاموش شوند. تحلیل عملکرد این مدار یک مطالعه عالی

در مورد عملکرد خازن و ترانزیستور است. برای شروع، فرض کنید C1 کاملاً شارژ شده است (ولتاژ آن تقریباً V_{CC}است)، C2 تخلیه شده، Q1 روشن است و Q2 خاموش. آنچه در ادامه اتفاق می‌افتد، به شرح زیر است:

- اگر Q1 روشن باشد، صفحه سمت چپ C1 (روی شماتیک مدار) به تقریباً ۰ ولت متصل است. این موضوع موجب می‌شود C1 از طریق کلکتور Q1 تخلیه شود.
- در حالی که C1 در حال تخلیه است، C2 به سرعت از طریق مقاومت R4 شارژ می‌شود.
- با تخلیه کامل C1 ، صفحه سمت راست آن به حدود ۰٫۶ ولت که می‌رسد، Q2روشن می‌شود.
- در این مرحله وضعیت مانند شروع است، اما این بار برای قطعات مقابل. یعنی C1 تخلیه شده، C2 شارژ شده، Q1خاموش و Q2 روشن است. در ادامه، مراحل تکرار می‌شود.
- روشن بودن Q2 به C2 اجازه می‌دهد تا از طریق کلکتور Q2 تخلیه شود. در حالی که Q1 خاموش است، C1می‌تواند نسبتاً سریع از طریق R1 شارژ شود.
- پس از تخلیه کامل C2 ، ترانزیستور Q1 دوباره روشن می‌شود و به همان وضعیتی که از ابتدا شروع کرده‌ایم برمی‌گردیم.

با انتخاب مقادیر خاص R2 ، C2، C1و R3 و نسبتاً کوچک نگه داشتن R1 وR4 ، می‌توانیم سرعت مدار مولتی ویبراتور خود را تنظیم کنیم:

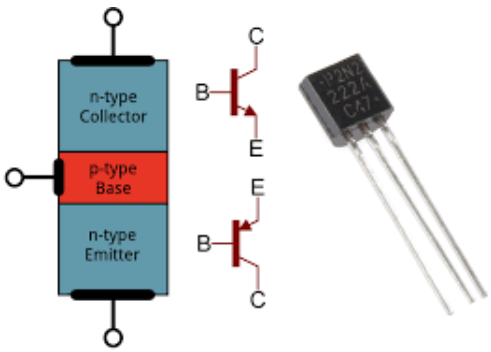
$$f = \frac{1}{\ln(2) \cdot (R_2C_1 + R_3C_2)}$$

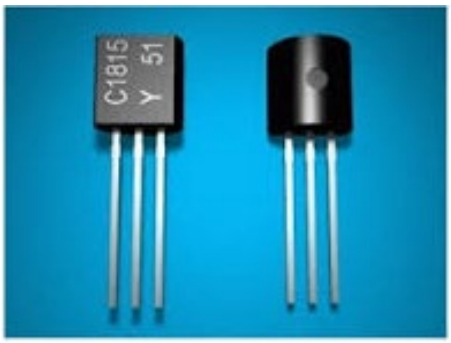
بنابراین، با توجه به اینکه خازن‌ها و مقاومت‌ها به ترتیب روی $10\mu F$ و $47k\Omega$ تنظیم می‌شوند، فرکانس اسیلاتور بالا تقریباً ۱٫۵ هرتز است. این یعنی هر LED تقریباً ۱٫۵ بار در ثانیه چشمک می‌زند.

انواع ترانزیستوراز لحاظ کاربرد

۱- ترانزیستور کاربرد عمومی و سیگنال کوچک (General Purpose / Small signal Transistor)

این ترانزیستور ها برای تقویت سیگنال های با ولتاژ و جریان با دامنه کم به کار می روند و معمولا در تقویت کننده های قدرت پایین یا متوسط یا برای مدار های کلیدی به کار می روند. بدنه این ترانزیستور ها معمولا پلاستیکی یا فلزی است و حداکثر توان مجاز آن ها از 0.5W تجاوز نمی کند. در شکل زیر چند نمونه از این ترانزیستور ها را مشاهده می کنید.





۲- ترانزیستورهای قدرت (Power Transistor)

این ترانزیستور ها قادر به تقویت سیگنال های با ولتاژ و جریان با دامنه زیاد هستند و معمولا در تقویت کننده های سیگنال بزرگ به کار می روند. حداکثر توان مجاز این ترانزیستور ها از 0.5W تا چند ده وات است. بدنه این ترانزیستور ها که معمولا فلزی است، به کلکتور اتصال دارد تا بتواند با محیط تبادل حرارت نماید. در توان های زیاد، بدنه به گرماگیر (هیت سینک) اتصال داده می شود. یکی از معروفترین ترانزیستورهای قدرت IGBT می باشد که در ادامه به توضیح آن می‌پردازیم.

در فرکانسهای بالای کلیدزنی از یک ترانزیستور BJT جهت کنترل سطح ولتاژ DC استفاده می‌شود. با بالا رفتن فرکانس ترانزیستور دیگر خطی عمل نمی‌کند و نویز مخابراتی شدیدی را با توان بالا تولید می‌کند. به همین سبب در فرکانس کلیدزنی بالا از المان کم مصرف ترانزیستور اثر میدانی نیمه رسانای اکسید-فلز Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor یا MOSFET استفاده می‌شود. اما با بالا رفتن قدرت، تلفات آن نیز زیاد می‌شود. المان جدیدی به بازار آمده است که تمامی مزایای۲ قطعه فوق را دارد و دیگر معایب BJT و POWER MOSFET را ندارد. این قطعه جدید(ترانزیستور دو قطبی با گیت عایق شده) IGBT نام دارد. در طی سالهای اخیر به دلیل ارزانی و مزایای این قطعه از آن استفاده زیادی شده است.

BJT ها وMOSFET ها دارای خصوصیاتی هستند که از نقطه نظرهایی یکدیگر را تکمیل می‌کنند. BJT ها در حالت روشن (وصل) دارای تلفات هدایتی کمتری هستند درحالیکه زمان سوئیچینگ آنها به خصوص در زمان خاموش شدن طولانی‌تر است.MOSFET ها قادرند که به مراتب سریعتر قطع و وصل کنند ولی تلفات هدایت آنها بیشتر است. IGBT یک ترانزیستوری است که مزایای BJT و MOSFET را باهم دارد مثل:

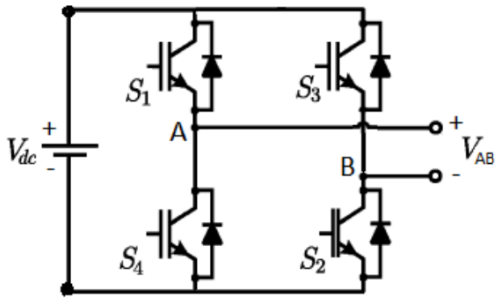
- امپدانس ورودی بالا مثلMOSFET
- افت ولتاژ و تلفات کم مانندBJT
- نظیر BJT دارای ولتاژ حالت روشن (وصل) کوچکی است.

سرعت سوییچ کردن این نوع دارای محدودیت بوده بطور نمونه 1KHz تا 50KHz که در کل بین دو نوع BJT و MOSFETT قرار می‌گیرد؛ و بخاطر امپدانس ورودی بسیار بالایی که دارد بسیار حساس می‌باشد؛ و بیشتر در کوره‌های القایی برای تقویت دامنه ولتاژ استفاده می‌شود؛ و در کل مورد استفاده این نوع ترانزیستورها بیشتر برای راه اندازی المانهای توان بالا می‌باشد. مهمترین و تقریباً تنها کارایی IGBTT سوییچینگ جریانهای بالا می‌باشد.

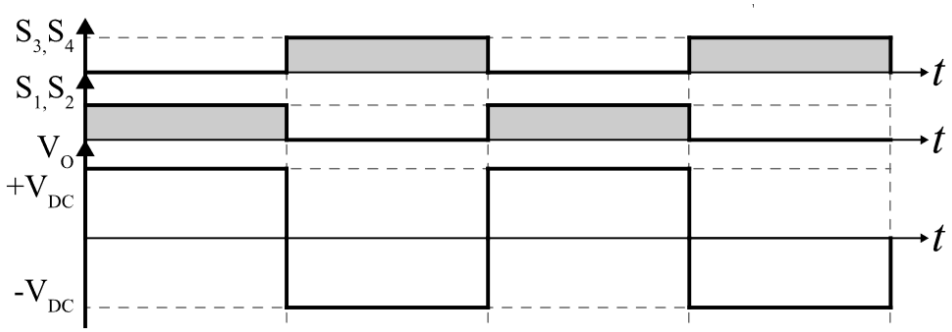
کاربرد ترانزیستورهای قدرت: اینورترها Inverter

یکی از کاربردهای IGBT استفاده در اینورتر است. اینورتر ولتاژ مستقیم DC را به متناوب ac با فرکانس دلخواه تبدیل میکند. اینورتر ها یکی از اجزا اصلی سیستم های فتو ولتاییک هستند زیرا برق تولید شده توسط آنها DC بوده و باید به ac تبدیل شود. طرز کار یک اینورتر تک فاز به صورت مختصر تشریح خواهد شد.

مطابق شکل زیر اینورتر تمام پل تک فاز از چهار کلید الکترونیکی (برای مثال IGBT) تشکیل شده که تشکیل دو ساق می‌دهند و بار به وسط این دو ساق متصل می‌شود. اگر کلیدهای S_1 و S_4 باهم روشن شوند، نقطه A به P و نقطه B به N متصل می‌شود و بدین ترتیب ولتاژ $+V_{DC}$ بر روی بار قرار می‌گیرد. در این حالت جریان از طریق کلید S_1 از منبع وارد بار شده و از طریق کلید S_4 به منبع بازمی‌گردد. حال اگر در سیکل بعد کلیدهای S_1 و S_4 خاموش شده و کلیدهای S_2 و S_3 روشن شوند ولتاژ $-V_{DC}$ بر روی بار قرار گرفته و جریان پس از گذشتن از کلید S_3 وارد بار شده و از S_2 به منبع باز می‌گردد. بدین ترتیب می‌توان ولتاژهای $+V_{DC}$ و $-V_{DC}$ را به تناوب روی بار قرار داد. «فرکانس کلید زنی» برابر فرکانس خروجی یعنی ۵۰ هرتز است. همچنین باید در نظر داشت که روشن شدن دو کلید از یک ساق موجب اتصال کوتاه شدن منبع می‌شود. شکل زیر مدار این اینورتر و شکل موج نهایی را نشان میدهد.



مدار اینورتر تک فاز پل



زمان روشن شدن کلیدها و شکل موج نهایی ولتاژ

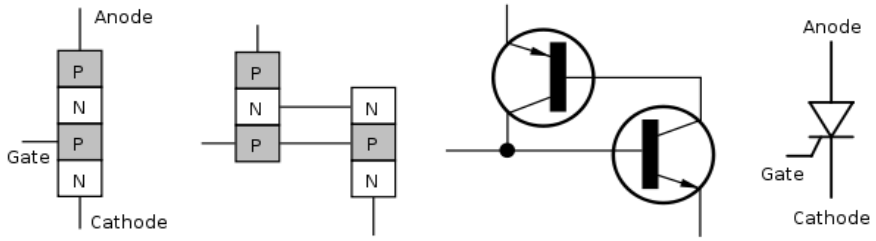
مشاهده میشود ولتاژ خروجی مربعی است. این ولتاژ علی رغم اینکه متناوب و ac است اما سینوسی نیست. یعنی با نوشتن سری فوریه آن سایر جملات نیز وجود دارد که اگر سینوسی خالص مورد نیاز باشد باید به طرق مختلف حذف شوند که در کتب الکترونیک قدرت به آن پرداخته شده است.

سوال۱: سری فوریه شکل موج نهایی را بدست آورده و راجع به جملات آن توضیح دهید.

تریستور Thyristor

تریستور یک قطعه نیمه‌رسانای چند لایه است که در مدارهای الکترونیک قدرت و الکترونیک صنعتی از آن استفاده می‌شود. گاهی تریستور را یکسوساز کنترل شده با سیلیکون (Silicon Controlled Rectifier) یا SCR نیز می‌نامند. در واقع تریستور یک دیود قابل کنترل است. بدین معنی که زمان روشن شدن قابل کنترل است. نماد مداری تریستور یک دیود قابل کنترل است. شکل زیر، نماد تریستور را نشان می‌دهد.

برخلاف دیود پیوندی که یک قطعه نیمه‌رسانای دو لایه (P-N) است، یا ترانزیستور دوقطبی متداول که سه لایه دارد (P-N-P یا N-P-N)، تریستور یک قطعه نیمه‌هادی چهار لایه (P-N-P-N) است. مشابه یک دیود، تریستور قطعه‌ای تک‌جهته است و جریان را فقط در یک جهت هدایت می‌کند. اما برخلاف دیود، تریستور بسته به چگونگی سیگنال اعمالی به گیتش می‌تواند به عنوان یک کلید مدار باز یا یک دیود یکسوکننده عمل کند. به عبارت دیگر، تریستورها فقط می‌توانند در حالت کلیدزنی عمل کنند و برای تقویت‌کنندگی به کار نمی‌روند. در شکل زیر ساختمان تریستور نشان داده شده است.

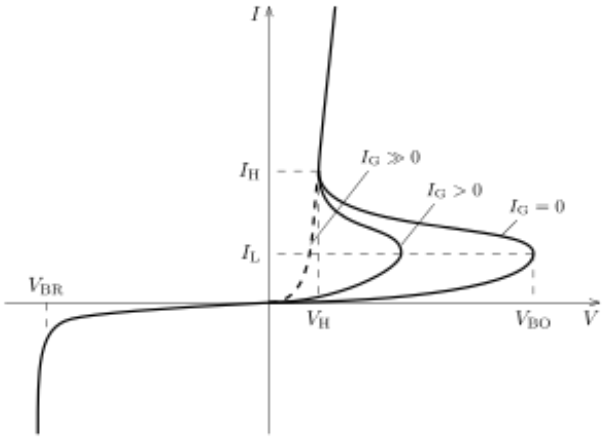


تریستور معادل دو ترانزیستور نیز است که جریان کلکتور ترانزیستور NPN یا TR2 مستقیماً بیس ترانزیستور PNP یا TR1 را تغذیه می‌کند. این دو ترانزیستور متصل، برای هدایت به یکدیگر وابسته هستند؛ به گونه‌ای که هر ترانزیستور، جریان بیس-امیتر خود را از جریان کلکتور-امیتر ترانزیستور دیگر می‌گیرد. بنابراین، تا زمانی که یکی از ترانزیستورها جریان بیس نداشته باشد، اتفاقی رخ نخواهد داد؛ حتی اگر ولتاژ آند-کاتد وجود داشته باشد.

روشن‌شدن تریستور: برای اینکه تریستور در وضعیت هدایت قرار بگیرد باید شرایط زیر برقرار باشد:

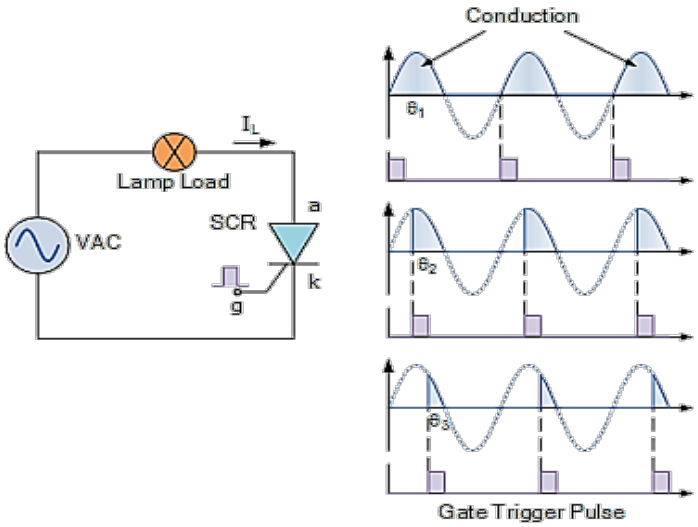
۱. ولتاژ آند نسبت به کاتد مثبت باشد.
۲. گیت یک پالس مثبت دریافت کند (ولتاژ گیت بیشتر از ولتاژ کاتد شود).
۳. برای روشن‌ماندن تریستور جریان آند باید به اندازه کافی زیاد باشد.

شکل زیر نمودار مشخصه ولتاژ به جریان تریستور را نشان میدهد. این نمودار شبیه به نمودار دیود است اما زمانی که به گیت جریان اعمال شود. سه شرط روشن شدن آن در نمودار قابل استنباط است!



زاویه آتش

برای شکل موج‌های متناوب ورودی می‌توان محور افقی را برحسب درجه از صفر تا ۳۶۰ تقسیم بندی کرد (معادل صفر تا 2π رادیان). اگر شرط مثبت‌بودن آند نسبت به کاتد برقرار باشد، می‌توان پالس اعمالی به گیت را به گونه‌ای تنظیم کرد که در لحظه‌ای بخصوص از شکل موج ورودی تریستور روشن شود که این لحظه معادل زاویه‌ای معین خواهد بود. به این زاویه، زاویه آتش تریستور می‌گویند. با تعیین زاویه آتش مناسب می‌توان مقدار مؤثر ولتاژ خروجی را تغییر داد که از آن در مدارهای کنترل دور موتورهای جریان مستقیم، یکسوکننده‌های کنترل‌شده و راه‌اندازهای نرم استفاده می‌شود. شکل زیر برش ولتاژ به ازای زاویه آتش مختلف را نشان می دهد.



سوال۲: اگر زاویه آتش ۳۰ درجه انتخاب شود مقدار متوسط ولتاژ خروجی برای یک شکل موج سینوسی به دامنه V را بدست آورید.

سوال۳: در شکل بالا اگر بخواهیم نیم موج پایین محور افقی به بالا منتقل شود و مقدار متوسط را افزایش دهیم چه راهکاری وجود دارد.

راهنمایی Triac

قسمت دوم

اندازه گیری الکتریکی و اندازه گیری دما

اندازه گیری

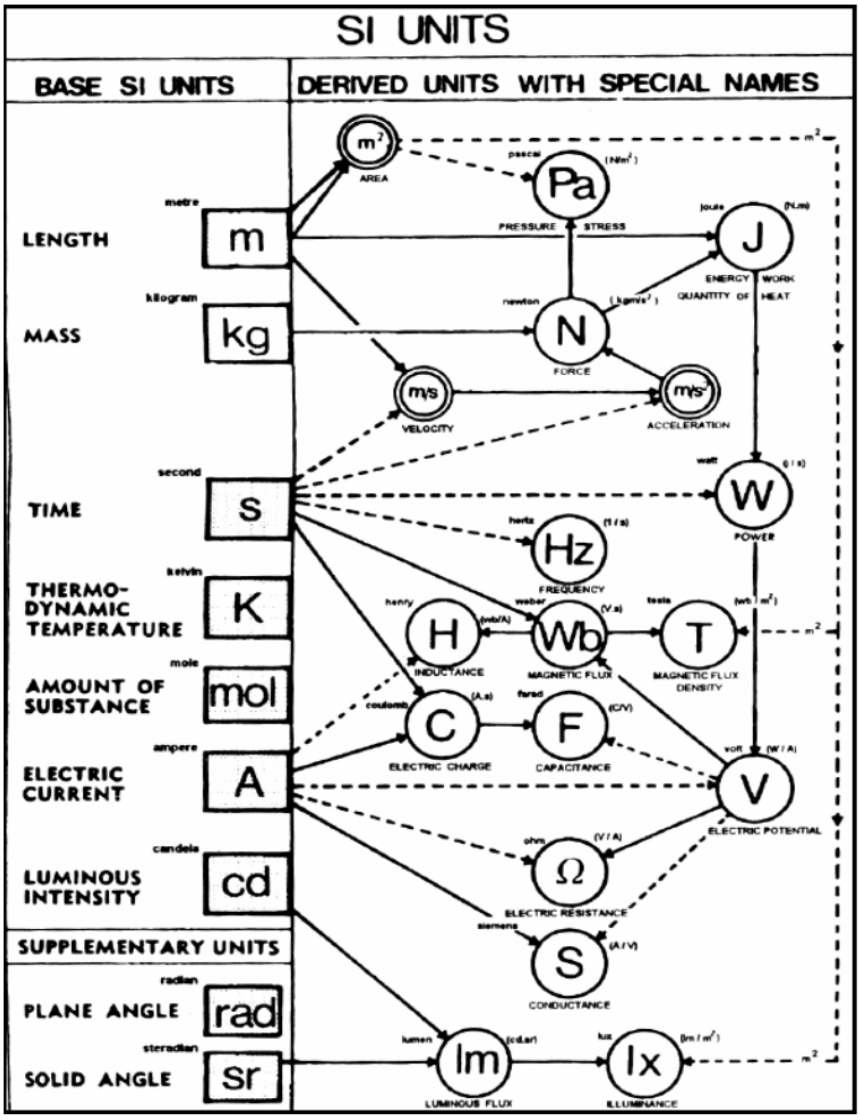
سنجش کیفیت‌ها بوسیله واحدهای قراردادی و نسبت دادن عدد به کیفیت مورد نظر، همان **اندازه‌گیری** است. بنابراین، اندازه‌گیری توصیف کمی (عددی) یک چگونگی در یک شی یا در یک پدیده است. البته این چگونگی یا مستقیماً بوسیله حواس قابل درک است، (همانند دما) یا خود نیز قراردادی است (مثل ولتاژ).
در اثر کثرت استعمال برخی از واحدهای قراردادی و به عبارت بهتر در اثر تکرار توصیف کمی برخی از چگونگی‌ها (مثل طول، وزن و...) هم اکنون آنها را کمیت می‌دانیم. در حالیکه اگر از ابتدا فرضاً برای "خستگی "هم توصیف کمی مناسبی پیدا و استعمال می‌شد، امروزه خستگی را نیز یک کمیت میدانستیم. کما اینکه هم اکنون برای هوش نیز همانند یک کمیت واقعی، واحد تعریف میشود، و اعدادی به آن نسبت داده می‌شود.

کمیتهای مرجع

مقدار یک کمیت با مقایسه کمیت مرجع یا "واحد" اندازه‌گیری مورد نظر، سنجیده می‌شود. در جهان امروز کمیات مرجع یا استاندارد نیاز به یک تعریف و توافق بین المللی دارند. هم اکنون برای کمیت‌های فیزیکی این توافق انجام شده و واحدهای سیستم بین‌المللی SI تعاریف معینی دارند. این واحدها به واحدهای اصلی و فرعی تقسیم می‌شوند. در واقع کمیات تعریف شده فیزیکی همگی از هم مستقل نیستند و تقسیم‌بندی فرعی و اصلی نیز به همین دلیل است. هفت واحد یا کمیت مبنا (اصلی) هم اکنون مورد توافق قرار گرفته‌اند که عبارتند از:

ردیف	نام کمیت	علامت	اسم واحد	نماد واحد
۱	طول، مکان، مسافت، جابجایی	l	متر	m
۲	جرم	m	کیلوگرم	kg
۳	زمان	t	ثانیه	S
۴	درجه حرارت	T	درجه کلوین	°K
۵	شدّت نور		شمع (candela)	Cd
۶	جریان الکتریکی	I	آمپر	A
۷	مقدار ماده خالص		مل(ملکول گرم)	mol
(واحدهای زاویه مسطحه (رادیان) و زاویه فضایی (استرادیان) نیز مورد بحث هستند.)				

جدول زیر نحوه اشتقاق کمیتهای فرعی از کمیت‌های مبنا را نشان می‌دهد. به عنوان تمرین، با استفاده از این جدول تعریف واحدهای V ولت، C کولمب را بر حسب واحدهای اصلی بدست آورید.



اندازه‌گیری الکتریکی

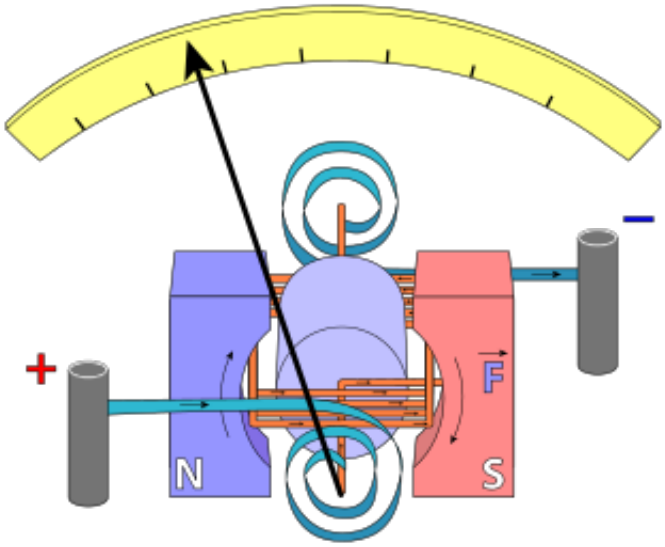
یک دستگاه اندازه‌گیری معمولاً نسبت به یک نوع ورودی مثلاً مکانیکی، الکتریکی و ... (با شرایط معین) پاسخگو است و بنابراین در بسیاری از موارد کمیت موردنظر مستقیماً توسط دستگاه مدرج شده ما قابل اندازه‌گیری نیست و لازم است کمیت برای استفاده دستگاه دچار تغییر و تحول شود. به طبقاتی که این آماده‌سازی را انجام میدهند، به همراه دستگاه اندازه‌گیری، سیستم اندازه‌گیری گفته میشود. هنگامی که در یک سیستم اندازه‌گیری، آخرین طبقه یعنی دستگاه اندازه‌گیری نسبت به ورودی الکتریکی حساس و پاسخگو باشد، دستگاه اندازه‌گیری از نوع الکتریکی یا الکترونیکی خواهد بود. تفاوت بین دستگاههای الکتریکی و الکترونیکی ناشی از اجزاء، مقاومت ورودی، حساسیت، صحت، دقت، پیچیدگی، روش‌های نمایشی و ... می‌باشد.

اندازه‌گیری جریان، ولتاژ و مقاومت

با توجه به اینکه در اندازه‌گیری کمیتهای الکتریکی خصوصا جریان با دستگاه های غیردیجیتال (آنالوگ) گالوانومتر یکی از قسمتهای اصلی دستگاه است ابتدا ساختمان گالوانومتر بررسی میشود.

❖ گالوانومتر

از درس فیزیک آموختیم که به یک سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی نیرو وارد میشود. حال اگر یک سیم پیچ حامل جریان داشته باشید که بتواند حول محور خود بچرخد و در میدان مغناطیسی قرار گیرد، گشتاور مغناطیسی وارد می‌شود. زاویه ای که سیم پیچ از طریق آن به دلیل گشتاور مغناطیسی منحرف می شود، متناسب با مقدار جریان سیم پیچ است. گالوانومتر اولین وسیله برای تشخیص و اندازه‌گیری جریان بود و به افتخار دانشمند ایتالیایی لوییجی گالوانی، گالوانومتر نامیده شده است. گالوانومتر از یک سیم پیچ مستطیل شکل تشکیل شده که روی یک قاب فلزی پیچیده می شود. سیم پیچ آزاد است تا حول محور ثابت بچرخد و در معرض میدان مغناطیسی آهنربا قرار دارد. از فنر برای تولید یک گشتاور معکوس استفاده می شود که گشتاور مغناطیسی را متعادل می کند و از این رو به ایجاد انحراف زاویه ای ثابت کمک می کند.



هنگامی که جریانی از سیم‌پیچ می‌گذرد، گشتاوری بر آن وارد می‌شود:

نیرو × فاصله = گشتاور

نیروی وارد شده بر هر سیم‌پیچ N دوری برابر است با:

$$F=NBil$$

بنابراین، گشتاور وارد شده بر سیم‌پیچ به دلیل عبور جریان از آن، به صورت زیر نوشته خواهد شد:

$$\tau=Fd$$

$$\tau=NBild$$

$$\tau=NBAi$$

که A برابر مساحت سیم‌پیچ است.

تعداد دورهای سیم‌پیچ، مساحت و میدان مغناطیسی وارد شده بر آن، ثابت هستند، بنابراین گشتاور را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$\tau = Gi$$

G ثابت جابجایی گالوانومتر نامیده می‌شود.

گفتیم برای بازگردان عقربه به مکان اولیه، دو فنر به دو سمت سیم‌پیچ متصل می‌شود، بنابراین گشتاوری در خلاف جهت گشتاور ناشی از میدان مغناطیسی بر آن وارد خواهد شد:

$$\tau c = K\theta$$

عقربه گالوانومتر پس از انحراف به اندازه زاویه θ، متوقف می‌شود. در این حالت، گشتاور ناشی از فنرها با گشتاور ایجاد شده توسط میدان مغناطیسی با یکدیگر برابر می‌شوند:

$$\tau = \tau c$$

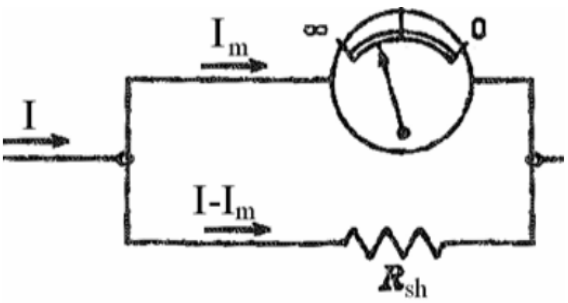
$$K\theta = Gi$$

$$\theta = (G/K)i$$

بنابراین θ با i متناسب است. یعنی هرچه جریان بیشتر شود زاویه انحراف بیشتر شده و اگر سیم پیچ به یک عقربه که پشت آن مسطح است متصل باشد میتواند شدت جریان را نشان دهد.

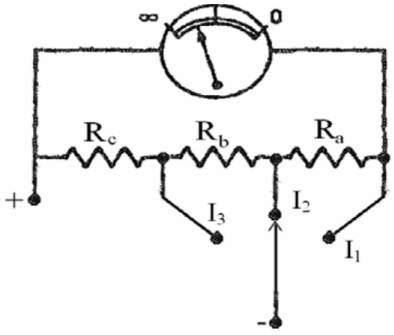
❖ آمپرمتر

با استفاده از گالوانومتر میتوان یک آمپرمتر ساخت اما مسئله عمده این است که در جریان عبوری از گالوانومتر محدودیت وجود دارد (معمولاً حداکثر جریان کار 50میلی آمپر است). بطور کلی برای افزایش محدوده اندازه‌گیری جریان توسط گالوانومتر از مقاومت شنت استفاده میشود. فرض کنیم جریان مورد نیاز برای انحراف کامل عقربه در حالتی که فقط سیم پیچ قاب گردان در مدل باشد،Im است و میخواهیم جریان نهایی قابل اندازه‌گیری توسط دستگاه I باشد در این صورت مقاومت شنت با استفاده از مدار شکل محاسبه میگردد:



$$KVL: I_m R_m = (I - I_m) R_{sh} \qquad \Rightarrow R_{sh} = \frac{I_m}{I - I_m} R_m$$

برای ساخت آمپرمتر با چند محدوده از شنت عام استفاده میشود. در شکل یک آمپر سه محدوده‌ای دیده میشود. در این مدار حالت داریم:



$$R_a + R_b + R_c = \frac{I_m}{I_1 - I_m} R_m$$

$$R_b + R_c = \frac{I_m}{I_2 - I_m}\left(R_m + R_a\right)$$

$$R_c = \frac{I_m}{I_3 - I_m}\left(R_m + R_a + R_b\right)$$

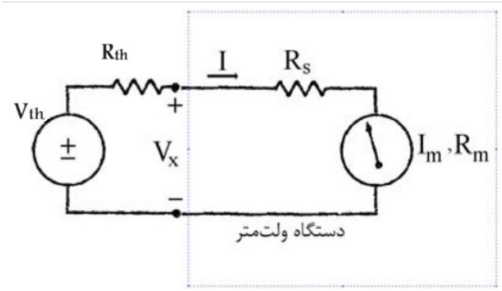
نکات عملی در کاربرد آمپرسنج:

- آمپرسنج نباید به دو سر منبع وصل شود. (همواره بصورت سری در مدار قرار میگیرد).
- قطبیت آمپرسنج باید رعایت گردد.
- برای اندازه‌گیری یک جریان مجهول از محدوده بالا به پایین حرکت شود.

تمرین – دلایل کافی برای هر یک از سه مورد فوق را بیان کنید.

❖ ولت متر

ولتاژ یا هر کمیتی که بتوان آن را به ولتاژ تبدیل نمود را می‌توان توسط ولت متر نمایش داد. مانند: فشار، دما، سطح. ولت متر آنالوگ شامل یک گالوانومتر حساس و مقاومت است. مقاومت داخلی یک ولت متر باید زیاد باشد. در غیر این صورت جریان قابل توجهی از مدار را مصرف خواهد نمود و در نتیجه باعث ایجاد اختلال در عملکرد مدار تحت تست می‌شود. قابل ذکر است که حساسیت گالوانومتر و مقدار مقاومت سری آن، رنج ولتاژی را که نمایش آن را دارد، تعیین می‌کند. فرض کنیم در مدار شکل زیر اندازه‌گیری ولتاژ V_{th} مطلوبست:



$$\frac{V_{th}}{R_{th} + R_s + R_m} = \frac{V_x}{R_s + R_m} \Rightarrow V_x = \frac{R_s + R_m}{R_{th} + R_s + R_m} V_{th}$$

یعنی ولتاژی که توسط دستگاه سنجیده شده با V_{th} تفاوت دارد.
اگر

$$R_{th} \langle\langle R_s + R_m$$
$$V_x \approx V_{th}$$

R_m مقاومت داخلی گالوانومتر است که عدد کوچکی است، بنابراین مقاومت سری R_x باید بزرگ انتخاب شود.
بنابراین میزان انحراف عقربه با ولتاژ رابطه مسقیم زیر را خواهد داشت:

$$\theta = kI = k\frac{V_x}{R_s + R_m} \Rightarrow \theta = k_v V_x$$

برای تعیین محدوده ولتاژ قابل اندازه گیری می توان R_s را محاسبه کرد:

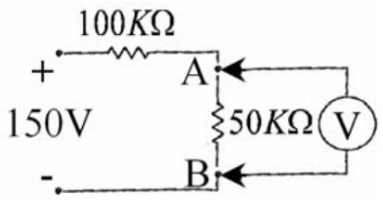
$$V_{max} = I_{max}(R_s + R_m)$$
$$R_s = \frac{V}{I_{\max}} - R_m$$

نکته: حساسیت ولتمتر بر حسب **اهم بر ولت** بیان میشود، که اگر عدد حساسیت را در حداکثر ولتاژ قابل اندازه گیری ضرب کنیم مقاومت معادل داخلی را نشان میدهد.

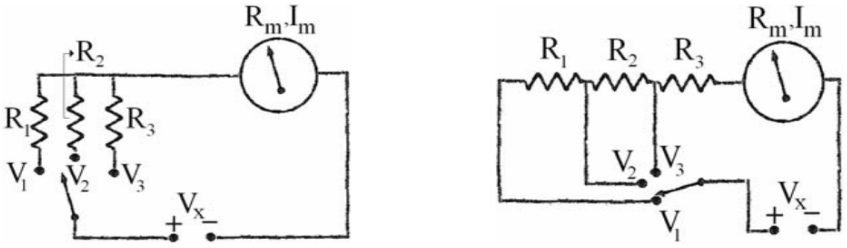
نکات عملی در کاربرد ولتمتر

- ولتمتر نبایستی بصورت سری در مدار قرار گیرد. (باید با عنصری که ولتاژ آن را میسنجیم موازی شود)
- قطبیت ولتمتر بایستی رعایت شود.
- برای اندازه‌گیری یک ولتاژ مجهول از محدوده بالا به پایین حرکت شود.

مثال) می‌خواهیم ولتاژ بین دو سر مقاومت 50KΩ را در مدار شکل زیر اندازه بگیریم. برای این کار دو ولتمتر در دسترس است. ولتمتر اول حساسیت 1000 Ω/v و دستگاه دوم 20000 Ω/v را دارد و هر دو گستره 0-50v را در بر میگیرند. مطلوب است تعیین
الف - خوانده هر یک از دو ولتمتر
ب –خطای هر قرائت بر حسب درصد مقدار صحیح



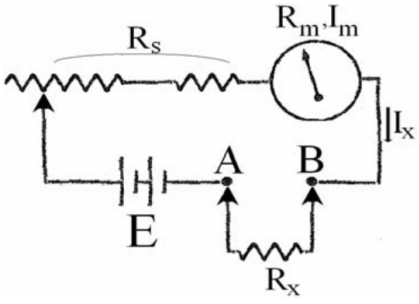
تمرین: روابط تعیین R_1,R_2,R_3 برای هر یک از دو ترکیب شکل زیر بدست آورید.



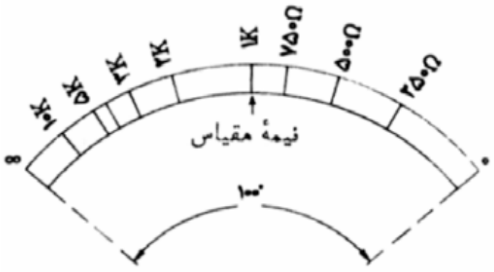
❖ اهم متر با استفاده از گالوانومتر

با استفاده از گالوانومتر میتوان مقاومت را بدست آورد. دو ساختار سری و موازی به صورت خلاصه تشریح میشود.

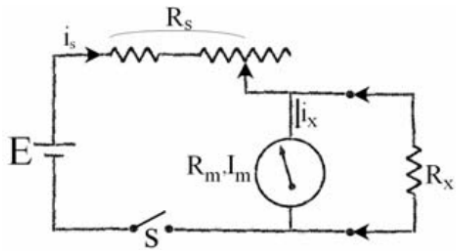
اهم متر سری: در شکل زیر مدار یک اهم متر سری مشاهده میشود:



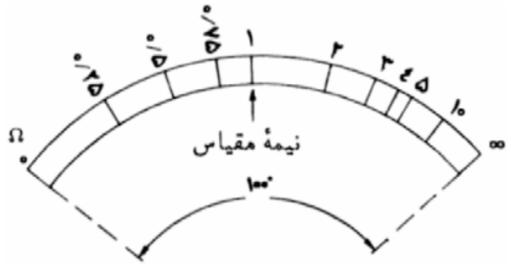
رابطه Rx و Ix یک رابطه غیرخطی است. از آنجا که زاویه انحراف با Ix رابطه خطی دارد. بنابراین درجه بندی اهم متر یک درجه بندی غیرخطی خواهد بود. بدیهی است به ازای $Rx = 0$ انحراف ماکزیمم و به ازای $Rx = \infty$ انحراف عقربه صفر خواهد بود و لذا درجه بندی غیرخطی اهم متر نسبت آمپرمتر یا ولتمتر معکوس نیز میباشد. که انحراف 50%به ازای $Rx=Rm+Rs$ بدست می آید. در شکل زیر درجه بندی این اهم متر نشان داده شده است.



اهم متر موازی: مدار این اهم متر در شکل زیر نشان داده شده است.



مقاومت داخلی اهم متر موازی کوچکتر از اهم متر سری است و بنابراین اهم سنج موازی برای اندازه گیری مقاومتهای کوچک مناسب تر است. در شکل زیر درجه بندی این اهم متر نشان داده شده است.

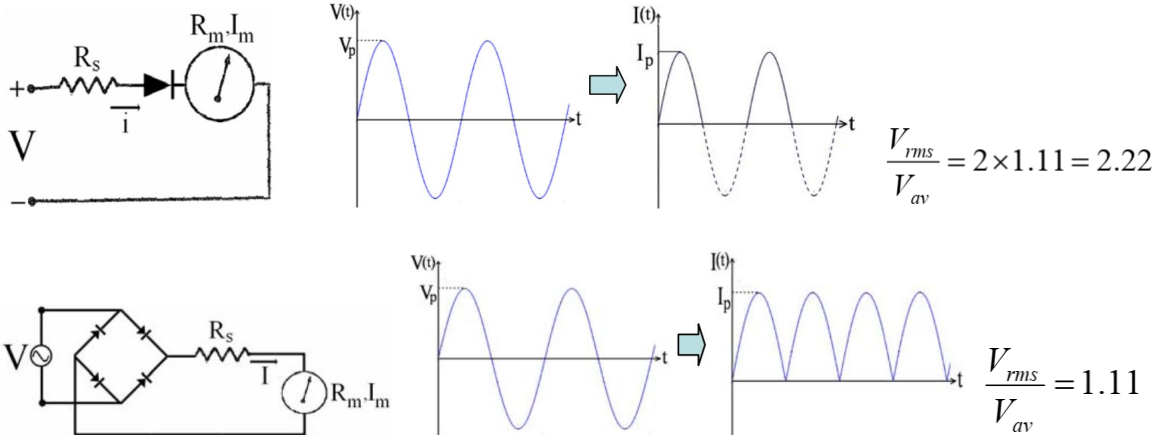


اندازه گیری ولتاژ و جریان AC به کمک گالوانومتر

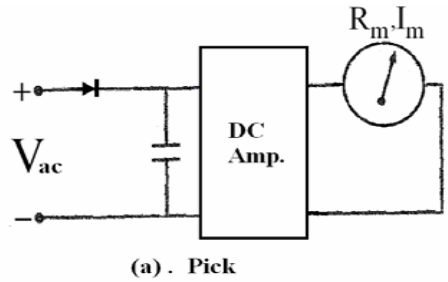
گالوانومتر قاب گردان یک متوسطسنج است. لـذا برای نمایش مقدار موثر یک موج متناوب به یکی از روشهای زیر عمل میشود.

۱- **تغییر شکل موج به نحوی که متوسط آن غیر صفر باشد:** برای این منظور موج را معمولاً از یک مدار یکسوکننده نیم موج یا تمام موج دیودی عبور میدهند. از نقطه نظر بسط فوریه موج یکسوشده دارای یک مقدار متوسط و مضاربی از فرکانس اصلی می‌باشد که با توجه به طبیعت پائین گذر گالوانومتر، تنها مقدار متوسط باعث انحراف عقربه شده و با قرارگرفتن فرکانسهای دیگر در خارج از باند عبور عملاً حرکت قابل ملاحظهای ایجاد نمی‌گردد. برای هر شکل موج خاص، بسته به آنکه به صورت تمام موج یا نیم موج یکسو شده باشد نسبت معینی بین مقدار موثر موج و مقدار متوسط موج یکسو شده وجود دارد. مثلاً برای موج سینوسی که تماماً یکسوشده باشد این نسبت 1.11 و برای موج مثلثی 1.15 و برای موج مربعی 1 است. بدین ترتیب در صورت مشخص بودن شکل موج و ضریب شکل مربوطه میتوان با اندازه گیری مقدار متوسط موج یکسو شده دستگاه را برحسب مقدار موثر مدرج نمود. در آمپرسنج‌ها و ولتسنج‌های تجاری معمولاً درجه‌بندی برای موج سینوسی در نظر گرفته شده است. لذا اندازه‌گیری هر موج غیرسینوسی توسط این دستگاهها منجر به خطای قرائت می‌گردد. میزان خطا تابعی از اختلاف ضریب شکل موج بین موج مورد نظر با موج سینوسی است. در شکل زیر یک ولتمتر AC با استفاده از دستگاه قاب گردان و یکسوکننده نیم موج نشان داده شده است. ضریب شکل موج در این حالت 2.22 میباشد چرا؟

$$\text{ضریب شکل موج} = \frac{\text{مقدار موثر موج اصلی}}{\text{مقدار متوسط موج یکسوشده}}$$



۲- **اندازه‌گیری مقدار موثر از طریق اندازه‌گیری مقدار پیک:** در این روش با اعمال ولتاژ ثابتی معادل ولتاژ پیک موج و با داشتن شکل موج می‌توان به مقدار موثر آن پی برد. به عنوان مثال در موج سینوسی نسبت مقدار موثر به مقدار پیک برابر با یک تقسیم بر رادیکال ۲ می‌باشد. بدیهی است که در این حالت نیز با تغییر شکل موج ورودی نسبت فوق تغییر کرده و دستگاه تجاری که بر اساس موج سینوسی مدرج شده دچار خطای اندازه‌گیری می‌شود. شکل زیر روش پیاده سازی ایده فوق را نشان می‌دهد.



(a). Pick

۳- **اندازه‌گیری مقدار موثر از طریق مستقیم:** در این روش ابتدا موج وارد هیتر شده و گرمای آن توسط ترموکوپل به ولتاژ تبدیل میگردد. ولتاژ حاصله باعث عبور جریانی میشود که توسط آمپرمتر قابل اندازه‌گیری است. در این مدار ولتاژ اندازه‌گیری شده مستقل از شکل موج ورودی بوده و لذا برای هر موج متناوب و یا غیر متناوب مثل نویز قابل استفاده میباشد. عیب دستگاه کند بودن آن و یکی از مزایایش عدم وابستگی به تغییرات دمای محیط میباشد.

❖ مالتی متر (مولتی متر)

دیدیم که برای آمپرسنج (ac,dc) ولتسنج (ac,dc) و اهمسنج می‌توان از یک گالوانومتر قاب گردان استفاده کرد و تفاوت دستگاه‌های فوق در مداری است که گالوانومتر در آن قرار می‌گیرد. بنابراین ممکن خواهد بود که با استفاده از یک گالوانومتر و کلیدهای متعدد و مداربندی مناسب دستگاهی ساخت که همه کاربردهای فوق را داشته باشد. چنین دستگاهی را یک مالتیمتر (چند سنجه) یا آمپر، ولت، اهم، متر AVOMETER میخوانند.

مولتی‌مترها در دو نوع آنالوگ و دیجیتال وجود دارند و برای مصارف گوناگونی طراحی می‌شوند. به وسیله یک سلکتور مدور بین کمیت‌های الکتریکی می‌تواند بر حسب نیاز گردش نماید برای استفاده از آن لازم است شما با هر کدام از آن کمیت‌ها آشنا باشید که برای هریک یک واحد مشخص اندازه گیری تعیین می‌شود.

مولتی متر آنالوگ : در ظاهر مولتی متر آنالوگ یا عقربه ای معمولاً از یک صفحه با تعدادی خطوط مدرج، یک عقربه که می‌تواند روی خطوط مدرج حرکت کند، یک سلکتور، تعدادی ترمینال، یک پتانسیومتر تنظیم صفر و دو سیم رابط تشکیل می‌شود. (در اینجا کاری به ساختمان داخلی مولتی متر عقربه ای نداریم و هدف فقط آشنایی با این نوع مولتی متر و نحوه استفاده از آن است). نمونه ای از این نوع مولتی متر در شکل زیر نمایش داده شده است.

در مولتی متر مورد نظر روی صفحه، برای کمیت‌های مختلف در چهار ردیف قوس‌های مدرج تعیین شده است که هر ردیف به درجات مختلف تقسیم شده است. روی صفحه علائم V برای اختلاف پتانسیل، A برای شدت جریان، Ω برای مقاومت الکتریکی، AC برای جریان متناوب و DC برای جریان مستقیم به کار رفته است. معمولا درجه بندی مربوط به مقاومت الکتریکی از راست به چپ و سایر درجه بندی‌ها از چپ به راست می‌باشد. شکل زیر طرز کار با مولتی متر را برای استفاده های مختلف نشان می دهد.

طرز کار با مولتی متر را برای استفاده های مختلف

سلکتور کلیدی است که می‌تواند روی صفحه دایره شکل حول خود حرکت کند. در محیط دایره درجاتی است که حوزه کار دستگاه را نشان می‌دهد. اعدادی که کلید سلکتور مقابل آنها قرار داده می‌شود ممکن است کوچکتر یا بزرگتر از درجات قوس‌های مدرج باشند. در عمل حوزه کار انتخاب شده را بر آخرین عدد قوس مدرج تقسیم نموده، حاصل تقسیم را که ضریب قرائت نامیده می‌شود در عدد متقابل به عقربه ضرب می‌نماییم. به این ترتیب مقدار کمیت به دست می‌آید.

مولتی متر دیجیتال : مولتی متر دیجیتال کمیت‌های اندازه گیری شده را به صورت رقم روی صفحه نمایش نشان می‌دهد و معمولاً واحد کمیت اندازه گیری شده را نیز به طریق مناسبی نمایش می‌دهد. در شکل زیر یک نمونه مولتی متر دیجیتالی معمولی قابل حمل نمایش داده شده است.

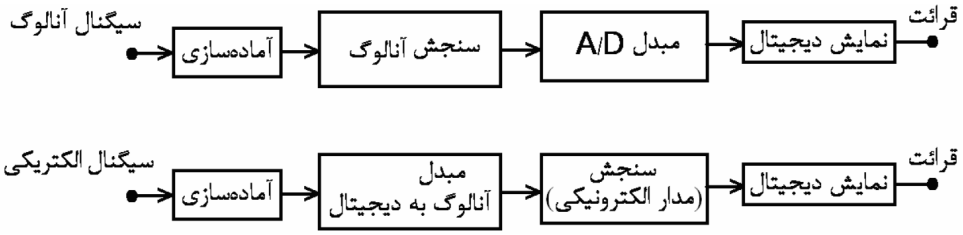
مولتی متر انبری: نوع دیگری مولتی متر دیجیتالی نیز وجود دارد که در آن علاوه بر امکانات بیان شده، انبری نیز وجود دارد . توسط این انبر می‌توان بدون نیاز به سری کردن مولتی متر با المان مورد نظر در مدار، جریان گذرنده از آن المان را اندازه گرفت. اگر سیم حامل جریان متصل به المان مورد نظر را بین انبرهای این مولتی متر قرار دهیم، مولتی متر مقدار جریان گذرنده از سیم و در نتیجه مقدار جریان گذرنده از المان مورد نظر را نمایش می‌دهد. بنابراین توسط این مولتی متر به راحتی و خیلی سریع می‌توان مقدار جریان را اندازه گرفت. در شکل زیر تصویری از یک مولتی متر دیجیتالی انبری نمایش داده شده است.

هنگام کار با دستگاه مولتی متر توجه به نکات زیر ضروری است:

۱ برای اندازه گیری شدت جریان باید دستگاه را به طور سری در مدار قرار داد.
۲ برای اندازه گیری اختلاف پتانسیل باید دستگاه را به طور موازی بین دو نقطه از مدار قرار داد.
۳ هنگام اندازه گیری مقاومت لازم است جریان برق را قطع کنیم. در غیر این صورت به دستگاه آسیب می‌رسد.
۴ دستگاه را با احتیاط جا به جا می‌کنیم و از وارد آمدن ضربه به آن و یا سقوط دستگاه جلوگیری می‌نماییم.
۵ پیچ تنظیم صفر دستگاه را نباید دستکاری کرد، زیرا این بخش از دستگاه خیلی حساس است و ممکن است فنر مربوط به آن قطع و دستگاه خراب شود.
۶ همیشه هنگام اندازه گیری کمیت‌ها کلید سلکتور را روی بیشترین درجه قرار می‌دهیم و در صورت لزوم به تدریج آن را کاهش می‌دهیم تا به دستگاه لطمه ای وارد نشود.
۷ حتی الامکان کلید سلکتور را در جهت حرکت عقربه‌های ساعت می‌چرخانیم، به علاوه چرخاندن سریع کلید سلکتور برای دستگاه خالی از ضرر نیست.

بررسی مختصر دستگاه‌های اندازه‌گیری دیجیتال

وسایل اندازه‌گیری دیجیتال به وسایلی گفته میشود که نتیجه اندازه‌گیری به صورت یک عدد روی صفحه نمایش ظاهر میشود. وسایل دیجیتال که امروزه در اندازهگیری بکار میروند در واقع وسایل الکترونیکی دیجیتال هستند. یعنی مشخصه اساسی این دستگاهها وجود عناصر نیمه هادی و مدارهای مجتمع عملیاتی و گیتهای منطقی نیمه هادی است و نتیجه کار نیز بصورت عدد در یک نمایشگر دیده می‌شود. بر این اساس دو نوع وسیله رقمی می‌توان متصور شد.



از ویژگی های این دستگاه ها

۱- قرائت آسان و بدون خطای دید

۲- سرعت نمایش به دلیل عدم وجود قسمت متحرک که دارای اینرسی مکانیکی است و مشکلات ناپایداری و نوسانات ناخواسته را ایجاد میکند

۳- صحت بالا (یا درصد خطای کم) نسبت به ابراز آنالوگ مشابه که معمولاً به نسبت ۱۰برابر است

۴- اثر بارگذاری کم (مصرف توان در داخل دستگاه جهت سنجش و نمایش یا کم است و یا از منبع دیگری بجز سیگنال ورودی تامین میگردد)

۵- دقت یا قدرت تفکیک دستگاه نسبت به دستگاههای آنالوگ بیشتر است.

نحوه عملکرد دستگاه اندازه گیری دیجیتال

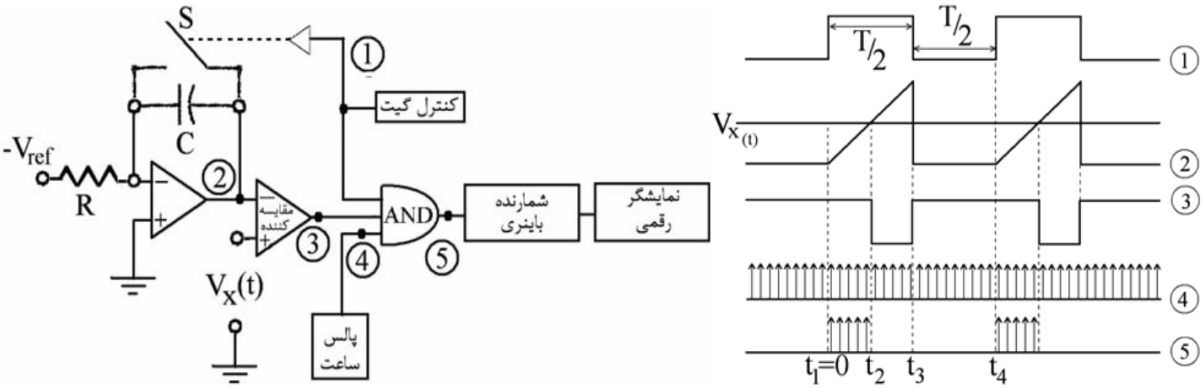
اساس کار این دستگاه ها بدین ترتیب است که ابتدا سیگنال ورودی به ولتاژ تبدیل شود (پس سنجه در واقع یک ولتمتر است) در مرحله بعد سیگنال های ac یکسو شده و به dc تبدیل می شوند. مرحله بعد که اساسی ترین بخش دستگاه است مبدل آنالوگ به دیجیتال بوده که به جای دامنه ولتاژ ورودی، تعدادی پالس (متناسب با دامنه) تولید می کند و به طبقه سنجش می دهد. طبقه سنجش یک شمارشگر است که پالسهای تولید شده (در یک محدوده معین) را میشمرد و پس از تنظیم و کد کردن سیگنالهایی به صفحه نمایش می فرستد. نمایشگر از لامپهای ۷ تکه (7 segment) یا LCD تشکیل میشود. بنابریان با وجود مبدل آنالوگ به دیجیتال A/D مسیر اندازه گیری و ماهیت دستگاه به صورت کلی عوض می‌شود.

مبدلهای A/D تنوع زیادی دارند که از آن جمله است: * مبدل موازی (همزمان) * مبدل پله‌ای * مبدل با روش تقریبات متوالی * مبدل با روش تبدیل ولتاژ به زمان (یک شیبی) * مبدل با روش دو شیبی * مبدل با روش تبدیل ولتاژ به فرکانس.

در اینجا مبدل یک شیبی مختصرا بررسی میشود.

مبدل آنالوگ به دیجیتال یک شیبی

در شکل زیر مدار و نمودار زمانی این مبدل نشان داده شده است.



از ولتاژ مرجع ثابت V_{ref} انتگرال گرفته میشود و V_2 که به صورت یک شیب (با شیب V_{ref}/R_1C) توسط یک مقایسه کننده با ولتاژ ورودی تحت اندازه گیری Vx مقایسه میشود. خروجی مقایسه کننده تا زمانی که ولتاژ V_2 به Vx نرسیده است دارای منطق یک بوده و لذا به گیت AND اجاره ورود پالس به شمارنده را میدهد. تا زمانی که این دو ولتاژ به هم برسند t_2 ادامه خواهد داشت. اگر فرض کنیم از لحظه t=0 تا $t= t_2$ تعداد N پالس شمارش شود، میتوان نوشت:

$$V_x = \frac{V_{ref}}{RC}.t_2 = \frac{V_{ref}}{RC}.\frac{N}{f_{clock}} \qquad \Rightarrow N = \frac{RC \cdot V_x}{V_{ref}} f_{clock}$$

این روابط نشان می‌دهد که مراحل تبدیل عبارتند از تبدیل ولتاژ ورودی به زمان و سپس اندازه‌گیری زمان توسط شمارش پالس. همچنین اثر فرکانس ساعت، ظرفیت خازن و مقاومت ورودی انتگرالگیر در عدد نهایی از روابط فوق قابل رویت است.

بدیهی است تعداد پالسها یعنی N با فرض ثابت بودن V_{ref}، C، R و f_{clock} رابطه مستقیم با دامنه ولتاژ Vx دارد، بنابراین هدف ما از تبدیل A/D برآورده شده است.

یکی از مشکلات این مبدل حساسیت به نویز یا تداخل همراه با سیگنال ورودی است محدودیت دیگر روش این است که سیگنال ورودی فقط باید مثبت باشد.

اندازه گیری دما

امروزه یکی از مهمترین بحث ها در صنعت، اندازه گیری است. در واقع با استفاده از تجهیزات ابزار دقیق می‌توان بر عملکرد فرآیندهای صنعتی نظارت داشته و خروجی آنها را کنترل کرد. دما، وسیع ترین کمیت مورد اندازه گیری در صنایع پروسسی است. محدوده وسیع کاربرد اندازه گیری دما و محیط های مختلف کاری آن، سازگاری های مهندسی مختلف سنسورهای دمایی را ایجاد کرده است.

دلایل اندازه گیری دما را میتوان با موارد زیر بیان کرد.

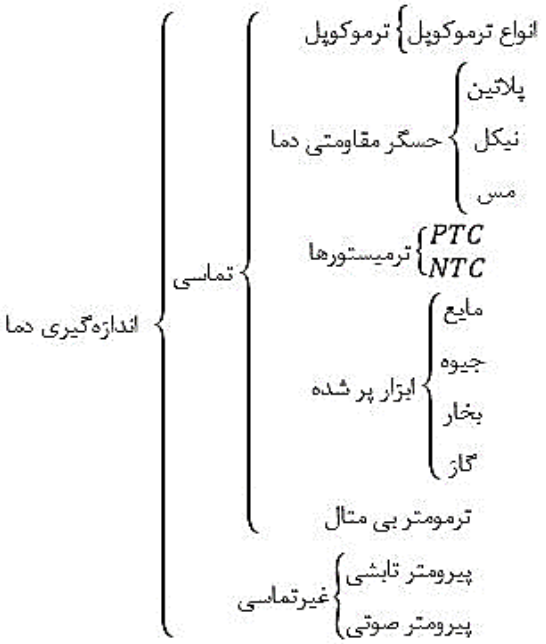
کیفیت محصول: محصولات مطلوب فقط تحت شرایط خاص دمایی تولید می شوند. اندازه گیری و کنترل دما، کلید کیفیت محصول است.

بازده: اندازه گیری و کنترل دقیق دما در برخی فرآیندها باعث کاهش مصرف انرژی و در نتیجه افزایش بازدهی می شود.

ایمنی: در واکنش های شیمیایی گرمازا، احتمال افزایش سریع دما وجود دارد. در نتیجه اندازه گیری دما تضمین امنیت است.

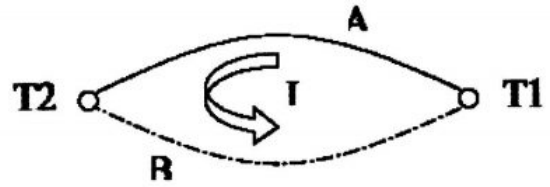
بارگیری محصول: سیالات (گاز) بر اساس دبی حجمی خرید و فروش می شوند و از طرفی دبی حجمی با دما تغییر می کند، در نتیجه دمای سیال باید دقیقا کنترل شود.

به طور کلی روشهای اندازه گیری دما به صورت زیر دسته بندی میشوند که هرکدام در ادامه بررسی خواهند شد. ترموکوپل، بعنوان سنسور اصلی دما که بیش از نیمی از همه کاربردها به آن اختصاص دارد، می باشد. مقاومت آشکار دما(RTD) حدود ٪۲۵ و ترمیستورها، حدود ٪۱۰تا ٪۱۵ از همه کاربردها را دارند. سنسورهای نیمه هادی و انواع مختلف پیرومترهای تشعشعی سایر گستره سنسورها را می پوشانند.



❖ ترموکوپل

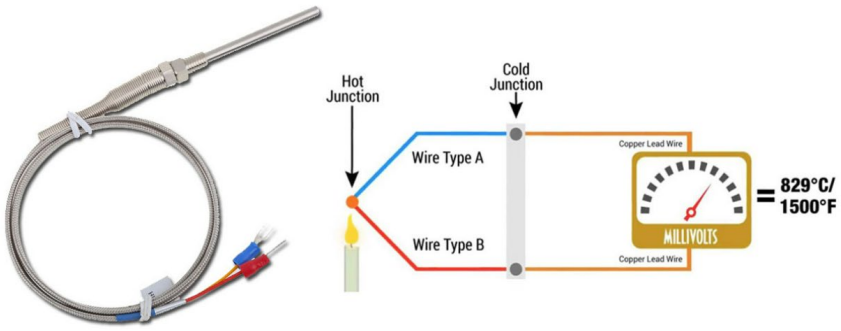
داستان ترموکوپل به کشف Seebeck در سال ۱۸۲۱ در مورد وجود یک جریان الکتریکی در مدار بسته ای از دو فلز غیر هم جنس، در حالی که دو نقطه اتصال در درجه حرارت های مختلف باشند بر می گردد. چنین ترموکوپلی در شکل زیر، نشان داده شده است.



در اینجا A و B دو فلز و T1 و T2 درجه حرارت های نقاط اتصال آنها هستند. I نشان دهندهٔ جریان ترموالکتریکی است که در مدار جاری است. معمولاً A نسبت به B در صورتی که اتصال T1 سردتر باشد، از لحاظ ترموالکتریکی مثبت خوانده می شود. وقتی دو سیم فلزی با جنس مختلف از دو انتها به یکدیگر متصل شوند و یک انتهای آن حرارت داده شود، یک جریان پیوسته در مسیر ترموالکتریک این دو سیم به وجود می آید. این پدیده توسط توماس سیبک در سال ۱۸۲۱ کشف شد.

بر اساس خاصیت ترموالکتریک، هر تغییر در درجه حرارت یک فلز باعث به حرکت درآمدن الکترون های آزاد آن می شود. بر اساس همین خاصیت، اگر دو تیغه از دو جنس مختلف را از یک سر بهم متصل کنیم و به محل اتصال حرارت دهیم. در این هنگام الکترون ها جریان پیدا کرده در نتیجه سر یک تیغه تراکم بار مثبت و سر تیغه ی دیگر تراکم بار منفی پیدا می کند.

هرقدر این تغییر دما، دریک فلز خاص، بیشتر باشد به همان نسبت جریان الکترون ها بیشتر خواهد بود که خود باعث تغییر بار الکتریکی در یک نقطه می شود.



اتصال گرم: محل اتصال دو تیغه به یکدیگر را اتصال گرم می نامند. این نقطه در تماس با فرآیند قرار می گیرد و حسگر ترموکوپل محسوب می شود.

اتصال سرد: به دو سر آزاد دو تیغه یک ولت متر جهت اندازه گیری اختلاف ولتاژ بوجود آمده، متصل می گردد. این محل، اتصال سرد یا مرجع محسوب می شود. توجه شود که اگر میخواهیم دمای جسم را بطور مطلق اندازه گیری کنیم، باید اتصال سرد در دمای $0^{\circ}C$ باشد وگرنه خطایی بنام خطای اتصال سرد ایجاد می شود.

انواع ترموکوپل

ترموکوپل ها از نظر جنس فلزات بکار رفته به چندین نوع تقسیم می شوند.

نوع E کرومل و کنستانتان /عمومیت بیشتری دارند زیرا دارای بزرگترین خروجی ولتاژ هستند، از فلزهای غیرمغناطیسی استفاده شده است.

نوع J آهن و کنستانتان /در دماهای بالاتر از 760 °C استفاده نمی شوند، چرا که آهن بخصوص در دماهای بالا دچار اکسیداسیون می شود.

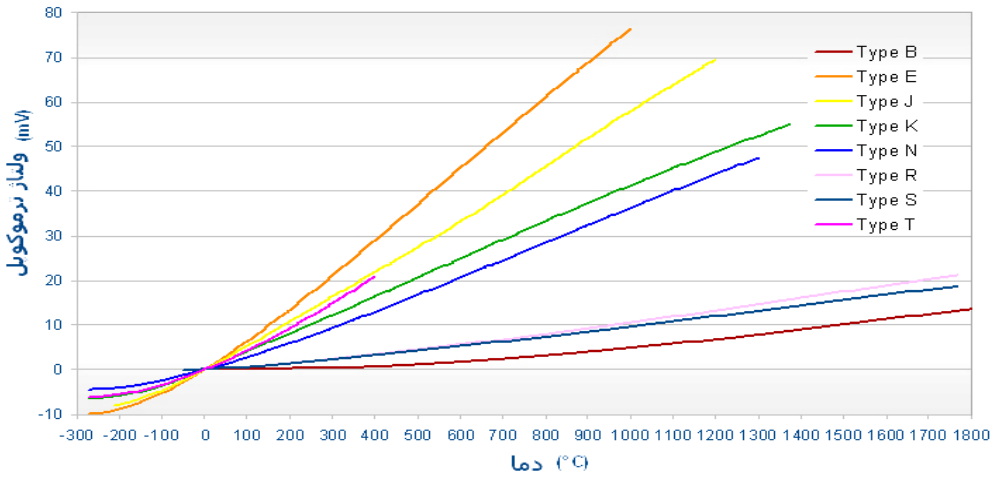
نوع T مس و کنستانتان /در دماهای خیلی پایین استفاده می شوند، در برابر رطوبت بسیار بالا مقاومند.

نوع K کرومل و آلومل /رایج ترین نوع ترموکوپل در صنعت هستند، ارزان و محدوده دمایی وسیعی دارند.

نوع N نیکروسیل و نیسیل /پایداری و مقاومت بالا در برابر اکسید شدن در دماهای بالا دارند.

نوع S,R و B پلاتین و رودیوم /برای اندازه گیری دماهای خیلی بالا مفید هستند (نوع B تا دمای (1800°C، تفاوت این سه نوع در میزان پلاتین آنها است، بخاطر حضور پلاتین گران قیمت هستند.

شکل زیر افزایش ولتاژ برای انواع مختلف ترموکوپل را نشان میدهد.



مزایا و معایب ترموکوپل ها

مزایا :هزینه کم، اندازه کوچک، مقاوم، محدوده کاری وسیع، پایدار در حد قابل قبول، دقیق برای تغییرات دمایی بالا

معایب :خروجی خیلی ضعیف در حد میلی ولت، دقت محدود برای تغییرات دمایی کم، حساس نسبت به نویز الکتریکی، غیر خطی، تبدیل پیچیده از ولتاژ به دما، خطای مربوط به اتصال سرد

❖ حسگرهای مقاومتی دما (RTD)

همان سالی که سیبک اختراع خود را درباره ترموالکتریک انجام داد، هامفری دیوی اعلام نمود که مقاومت فلزات وابسته به دما است. پنجاه سال بعد، ویلیام زیمنس استفاده از پلاتینیوم را به عنوان ترمومتر مقاومتی پیشنهاد نمود. این سنسورها از نظر ظاهری به شکل مقاومت های سیمی هستند و غالباً به شکل یک سیم پیچ غیر

القائی یا نیکل ساخته می شوند. RTD مخفف عبارت Resistance Temperature Detector و به معنای حسگر مقاومتی دما است. پس از اینکه مقاومت RTD تعیین شد، باید با استفاده از یکی از معادلات تبدیلی به مقدار دمای متناظرش تبدیل شود.

ضریب دمایی: مقدار این ضریب، حساسیت تجهیز اندازه گیری را تعیین میکند. این ضریب بیانگر میزان تغییر مقاومت فلز در ازای تغییر دماست.

انواع فلزات برای حسگر:

پلاتین: دقت، تکرارپذیری و تغییر مقاومت بالایی به ازای تغییر دما دارند. در محدوده دمای کاری بسیار خطی هستند. اما گران اند.

مس: نسبت به پلاتینی محدوده دمایی کوچکتر و دقت کمتری دارند.

نیکل: ویژگی خطی ضعیف، دقت محدود، تکرارپذیری کمتر و محدوده دمایی کاری نسبتاً کوچکی دارند. اما ضریب دمایی بزرگتری نسبت به دو جنس دیگر دارند.

توجه: از مس و نیکل در مواردی که دقت موضوع حیاتی نیست، استفاده می شود. (مثل سیم پیچ های موتور و یاتاقان ها)

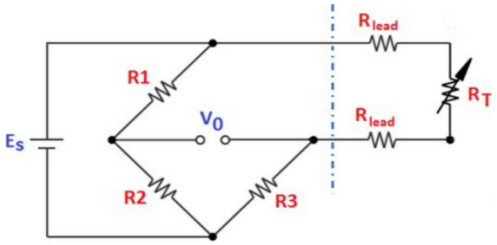
PT100 و PT1000 دو نمونه از رایج ترین نوع RTD در صنعت هستند.عبارت PT بیان می کند که جنس فلز، پلاتین است. عبارت ۱۰۰ و ۱۰۰۰ هم مقاومت فلز بر حسب اهم در دمای ۰°C است.

برای خواندن دقیق دما از یک RTD باید مقاومت المان حسگر آن اندازه گیری شود. اما هر سیم رابط مسی که به المان حسگر وصل می شود خود دارای مقاومت است که این مقاومت به مقاومت المان اضافه می شود. اگر مقاومت اضافه شده را نادیده بگیریم، یک خطا بوجود می آید و اندازه گیری دما دقیق نخواهد بود، خطای حاصل تاثیر سیم رابط نامیده می شود.

برای جبران سازی تاثیر سیم های رابط، از RTD های سه سیمه و چهارسیمه بجای دو سیمه استفاده می شود. روش پل وتستون برای RTD کاربرد دارد و بدین ترتیب مقاومت های سیم ارتباطی به دو نیم شده و در دو قسمت پل وتستون قرار می گیرند

RTD دو سیمه

مقاومت سیم های اتصال به مقاومت RTD اضافه می شود و از اینرو خطای اندازه گیری افزایش می یابد. نمودار مداری RTD دو سیمه در شکل زیر آمده است.



در اینجا R1، R2 و R3 مقاومتهای پل وتستون هستند. Rlead مقاومت مقدار مشخصی از سیم اتصال است. RT مقاومت RTD است. در شرایط تعادل پل

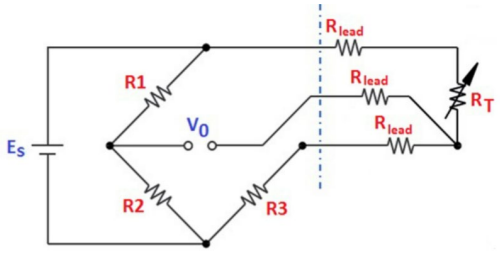
$$(R1/R2) = (Rx) / (R3)$$

$$Rx = (R1/R2)(R3)$$

در اینجا Rx مجموع مقاومت RT و مقاومت سیم های اتصال است. از روابط بالا، واضح است که مقاومت سیم های اتصال در اندازه گیری خطا وارد می کند.

RTD سه سیمه

RTD سه سیمه بسیار دقیق تر از RTD دو سیمه اندازه گیری را انجام می دهد. RTD سه سیمه به طور وسیعی در اندازه گیری دما برای کاربردهای صنعتی استفاده می شود. نمودار مداری یک RTD سه سیمه در شکل زیر نشان داده شده است.



به عبارت ساده، معادله پل وتستون به صورت زیر است.

$$(R1/R2) = (RT+Rlead) / (R3 +Rlead)$$

در معادله بالا، ، صورت و مخرج قسمت سمت راست معادله با Rlead افزایش می یابد و بنابراین به دلیل مقاومت سیم اتصال، نسبت تحت تأثیر قرار نمی گیرد. باید دقت شود که طول هر دو سیم اتصال یکسان باشد. بنابراین، جبران سیم های اتصال را می توان از طریق RTD سه سیمه انجام داد.

در شرایط تعادل پل

$$RT + Rlead = R3 + Rlead$$

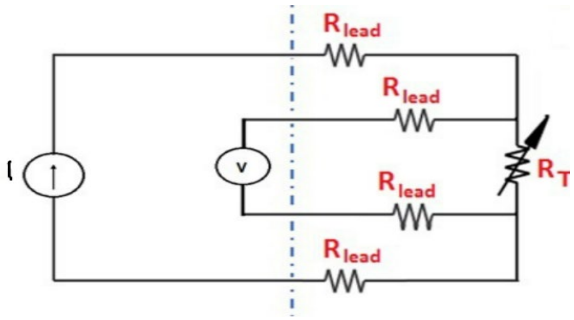
$$RT = R3$$

در RTD سه سیمه، مقاومت سیم اتصال Rlead با کمک سیم اتصال سوم همدیگر را خنثی می کنند. از اینرو اندازه گیری تحت تاثیر مقاومت سیم اتصال قرار نمی گیرد. باید دقت شود که مقاومت هر دو سیم اتصال مشابه باشد. بنابراین، جبران اثر سیم های اتصال را می توان با دقت از طریق RTD سه سیمه انجام داد. جبران سازی مقاومت سیم اتصال به درستی انجام می شود اگر مقاومت تمامی سیم ها یکسان باشد. در غیر اینصورت، ، به دلیل عدم تطابق مقاومت سیم های اتصال در اندازه گیری دما خطا وجود خواهد داشت.

RTD چهار سیمه

RTD چهار سیمه برای از بین بردن کامل خطای اندازه گیری ناشی از مقاومت سیم استفاده می شود. در RTD سه سیمه و RTD دو سیمه، دمای اندازه گیری شده بر اساس تغییر در مقاومت است. بدین وسیله خطا ایجاد می شود. در RTD دو سیمه مقدار خطا بالا است و در RTD سه سیمه مقدار خطا خیلی کمتر می باشد. اما در RTD چهار سیمه، ما دما را بر اساس مقاومت اندازه گیری نمی کنیم. ما از یک منبع جریان ثابت به صورت سری با دو سیم اتصال RTD چهار سیمه استفاده می کنیم و افت ولتاژ را در دو سیم دیگر RTD چهار سیمه اندازه گیری می کنیم. طبق قانون اهم، V=IR

مقدار جریان در اینجا ثابت است (خیلی کم). ولتاژ بر اساس تغییر مقاومت تولید می شود که به نوبه خود به دمای اندازه گیری شده بستگی دارد. به همین دلیل است که در RTD چهارسیم نسبت به RTD های ۲ یا ۳ سیم برای اندازه گیری دما بر اساس سیگنال ولتاژ به جای مقاومت دقیق تر است. نمودار مداری RTD چهار سیمه در شکل زیر نشان داده شده است.



نتیجه گیری

۱- سنسور RTD دو سیمه بدلیل مقاومت سیمهای اتصال خطای بیشتری را در اندازه گیری وارد می کنند. RTD دو سیمه برای جاهایی مناسب است که ترانسمیتر در مجاورت RTD نصب می شود.

۲- سنسور RTD سه سیمه برای کاربردهای صنعتی مناسب است. در سیستم اندازه گیری دمای سه سیمه جبران سازی مقاومت سیمهای اتصال امکان پذیر است. خطای ایجاد شده توسط مقاومت سیم های اتصال کاملا حذف می شود.با این وجود نامساوی بودن مقاومت سیم های اتصال می تواند در اندازه گیری خطا ایجاد کند.

۳- سنسور RTD چهار سیمه بهترین انتخاب برای کاربردهایی که نیاز به اندازه گیری دقیق دما دارند می باشد.

یکی از مشکلات استفاده از RTD نداشتن یک استاندارد واحد برای RTD ها است. چندین استاندارد، مقادیر متفاوتی برای ضریب دمایی مقاومت یک فلز داده شده، تعیین کرده اند . بعلاوه سازندگان نیز درصد خطا (تلزانس)های مختلفی را در ساخت RTD ها مشاهده می کنند. بنابراین مشکلات دقت در زمانی که RTD هایی از سازندگان مختلف در یک سیستم مشابه استفاده شود، بوجود می آید یا زمانی که RTD یک تولید کننده جایگزین RTD تولید کننده دیگر می شود .برای جلوگیری از خطای دقت ممکن، بایستی در استفاده درست از منحنی تغییرات دما بر حسب مقاومت، در زمان کالیبراسیون سیستم های RTD دقت لازم را مبذول داشت.

مزایا و معایب RTD

مزایا: دقت و تکرارپذیری بهتر/ خطاهای مربوط به اتصال سرد مطرح نیست/ در محدوده دمایی خطی تر هستند/ پاسخ سریع

معایب: شکننده و دارای ابعاد بزرگ/ حساس در برابر لرزش با فرکانس بالا/ مشکل گرم شدن/ هزینه تست/ تشخیص عیب بالا/ قیمت بالا

- **ترمیستور**

ترمیستورها یک تجهیز نیمه هادی است که از اکسیدهای فلزی ساخته شده است. اساس اندازه گیری دما به وسیله یک ترمیستور این است که مقاومت الکتریکی آن با دما تغییر می کند. اغلب ترمیستورها دارای ضریب مقاومتی منفی هستند و از اینرو با مقاومت های معمولی تفاوت دارند. ضریب مقاومتی منفی به این معنی است که با افزایش دما مقاومت کاهش می یابد. هرچند ترمیستورهای با ضریب دمایی مثبت (PTC) نیز وجود دارند اما ترمیستورهای با ضریب دمایی منفی(NTC) رایج تر هستند. ترمیستورها در شکل های مختلفی ساخته می شود. رایج ترین آن ها، دیسکی، مهره ای و میله ای است. طیف وسیعی از ترمیستورها (هم از نظر مقاومت و هم از نظر دما) وجود دارد که با تغییر در میزان ناخالصی مواد نیمه هادی ساخته می‌شوند.

ترمیستورها ضریب دمایی خیلی بالاتری نسبت به RTDها دارند، به همین دلیل تغییرات کوچک دما راحت تر قابل تشخیص است. ترمیستورها دقت RTDها را ندارند و احتمالا به همین دلیل کاربرد آنها به عنوان ابزار دقیق محدود است. ترمیستورها دما را از ۷۳- تا ۳۱۶+ سانتیگراد اندازه گیری می کند.

باتوجه به هزینه کم و حساسیت بالای ترمیستورها، اغلب برای تشخیص وضعیتهای آلارم فرایند از ترمیستورها استفاده می شود. (به عنوان مثال برای تشخیص دمای سیم پیچ موتورها، دمای یاتاقانها و دمای سیم پیچ ترانسفورماتور ها).

مزایا و معایب ترمیستورها

مزایا: اندازه کوچک/ پاسخ سریع/ حساسیت خیلی بالا/ نیاز نداشتن به جبران سازی اتصال سرد/ ارزان/ تنوع سنسورها/ مناسب برای اندازه گیری از راه دور بر خلاف ترموکوپل ها و RTD ها

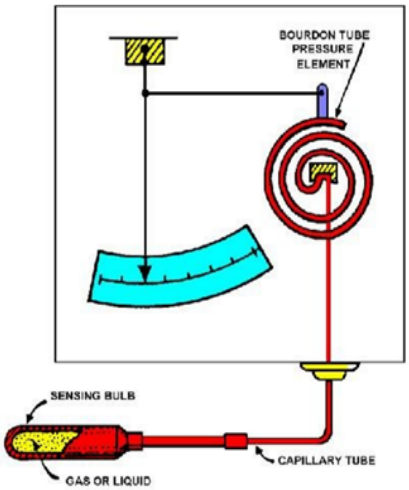
معایب: غیر خطی/محدوده کاری کم (۷۳- تا ۳۱۶ درجه C)/ شکننده/ دقت پایین/ مشکلات ناشی از نویز

❖ ابزار پرشده

اساس کار این روش، قانون انبساط و انقباض مواد است. طبق این قانون، افزایش دما باعث افزایش حجم مواد و کاهش دما سبب کاهش حجم مواد می شود.میزان تغییر حجم در مواد مختلف، متفاوت است:

گازها << مایعات < جامدات

بر اساس این قانون اگر یک سیال را در یک مخزن با شرایط خاص محبوس کنیم و به آن حرارت دهیم، در اثر افزایش حجم، فشار آن بالا می رود. که با نصب یک فشارسنج به مخزن، می توان تغییرات فشار را ثبت کرد. و در نهایت با استفاده از معادلات حاکم، تغییرات دما استخراج می شود. تصویر زیر شماتیکی ساده از ابزار پرشده را نشان می دهد. که از یک حباب به عنوان مخزن سیال و حسگر در تماس با فرآیند و از لوله های مویین برای انتقال فشار سیال به گیج فشار استفاده می کند.



ویژگی انواع مختلف ابزار پر شده:

کلاس	حالت سیال	نوع سیال	محدودیت حداقل دما	محدودیت حداکثر دما	محدوده دما (°C)
I	مایع	اکسیلن (آب)	نقطه انجماد مایع	ناپایدار شدن مایع	315 تا 210-
II	مخلوط بخار و مایع	بوتان، پروپان، هگزان، کلر، بنزین و ...	کاهش حساسیت در دماهای پایین	نقطه بحرانی سیال	315 تا 40-
III	گاز	نیتروژن یا هلیوم	نقطه بحرانی گاز	محدودیت دمایی حباب	667 تا 268-
Y	مایع	جیوه	نقطه انجماد جیوه	نقطه جوش جیوه	649 تا 40-

مزایا و معایب ابزار پر شده:

مزایا :عملکرد ساده/ ارزان/ نیاز نداشتن به تغذیه/ حساسیت و دقت خوب/ مقاوم در برابر لرزش و ارتعاش

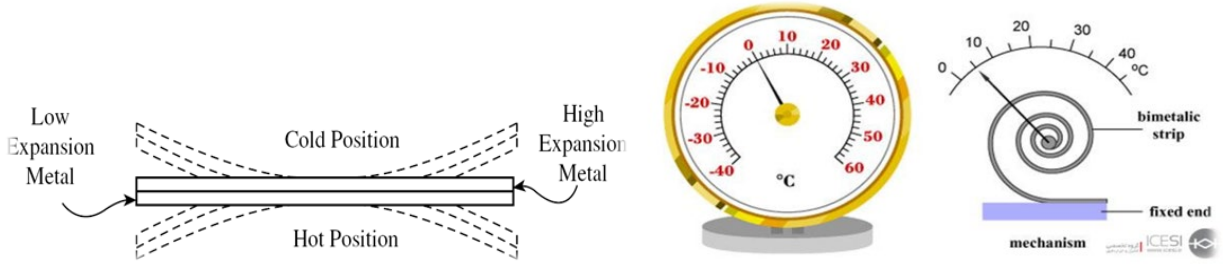
معایب :حباب حجیم/ سرعت پاسخ پایین/ فقط برای محدوده های بزرگ/ غیر خطی

❖ بی متال

ترمومترهای بی متال بر اساس دو اصل اساسی ساخته می شوند:

۱. حجم فلزات با تغییر دما تغییر می کند. ۲. ضریب این تغییر برای همه فلزات یکسان نیست.

اگر دو فلز مستقیم و متفاوت به یکدیگر چسبانده شده و حرارت داده شوند، نوار حاصل از طرف فلزی که دارای ضریب انبساط کمتری است خمیده می شود. میزان این تغییر شکل، متناسب با مجذور طول نوار و تغییرات دمایی و بطور معکوس متناسب با ضخامت فلزهاست. چون میزان جابجایی بوجود آمده توسط نوار بی متال خیلی کوچک است، برای تقویت آن، نوار بی متال به شکل فنری یا حلزونی ساخته می شوند. از بی متال بطور معمول تا ۴۰۰ °C استفاده می شود و بی متال ها اکثرا در ترموستات ها و سوئیچ های دمایی کاربرد دارند.



مزایا و معایب بی متال

مزایا: ارزان/ ساخت ساده/ احتمال شکستن کمتر نسبت به ابزار پرشده

معایب: دقت محدود/ فقط قابل استفاده برای نمایش یا سوییچینگ ساده/ خارج شدن از وضعیت کالیبره در اثر شوک

❖ پیرومتر

دو روش غیر تماسی اصلی عبارتند از: پیرومترهای تابشی(Radiation Pyrometers) و پیرومترهای صوتی (Acoustic Pyrometers)

۱- پیرومتر تابشی:

تشعشع نوعی انتقال انرژی گرمایی است که از اجسام بصورت امواج الکترومغناطیس صادر می گردد. این پیرومترها بر این اساس ساخته شده اند که کلیه اجسام در دمای بالاتر از صفر مطلق تشعشع گرمایی دارند.

ترمومترهای تابشی، چگالی انرژی تابشی را اندازه گیری کرده و سیگنالی متناسب با دمای آن شی تولید می کند. مقدار انرژی تشعشعی منتشر شده و طول موج آن، متناسب با دمای شی است.

در تشعشعات گرمایی، با افزایش دما، طول موج کاهش می یابد. در کاربردهای صنعتی بخش عمده تشعشعات گرمایی در محدوده مادون قرمز (طول موج ۰.۷ تا ۱۰۰۰میکرومتر) اتفاق می افتند. یک ترمومتر تابشی در ساده ترین حالت شامل یک سیستم و آشکارساز نوری است. سیستم نوری انرژی منتشر شده توسط شی را روی یک آشکارساز که حساس به تابش است متمرکز می کند. خروجی آشکارساز متناسب با مقدار انرژی تابش یافته توسط شی و با توجه به طول موجهای تابشی است. از این خروجی می توان برای تعیین دمای شی استفاده کرد.

۲- پیرومتر صوتی:

سرعت صوت در یک گاز متناسب با دمای آن است. در روشی، از دو پراب کوارتز که در فاصله ای مشخص از هم قرار دارند استفاده می شود. سرعت صوت با اندازه گیری پیوسته زمان گذر موج صوتی تعیین می شود. اندازه گیری دما به این روش نه تنها برای گازها میسر است بلکه برای مایعات و جامدات نیز قابل استفاده است.

از پیرومترها برای تعیین دمای اشیای متحرک، حرارت بالا و یا هر سطحی که نتوان به آن نزدیک شد، استفاده می شود.

مزایا و معایب پیرومترها

مزایا: محدوده دمایی بالا (تا حدود ^{o}C ۴۰۰۰)/ اندازه گیری بدون تماس/ سرعت پاسخ بالا

معایب: قیمت بالا/ کالیبره مشکل/ ذرات جاذب در هوا مثل بخارآب، گرد و غبار و دود خطا ایجاد میکند.

مهمترین منابع:

-راهنمای جامع ابزار دقیق کاربردی/ جعفر رضوی/ نشر ایده نگار/ ۱۳۹۶

-اصول اندازه گیری الکتریکی/ فتح الله نظریان/ فنی و حرفه ای/۱۳۹۱

-اصول و مبانی ابزار دقیق/ حمید فضلعلی/ شرکت ملی گاز ایران /۱۳۸۹

-جزوه درس اندازه گیری مجتبی پیشوایی

Faradars-

- Temperature measurement, control key to plant performance\ ISA publication\2010- IPS-E-IN-120