جمهوری اسلامی ایران
وزارت آموزش و پرورش
تهیه و تنظیم در دفتر برنامه‌ریزی و تألیف کتب درسی

الکترونیک عمومی

۱

فنی و حرفه‌ای (رشته‌های الکترونیک ـ الکترونیک و مخابرات دریایی)

۳۵۹/۴۲

نظام جدید آموزش متوسطه

بسم الله الرحمن الرحیم

الکترونیک عمومی (۱)

رشته‌های الکترونیک ـ الکترونیک و مخابرات دریایی

زمینهٔ صنعت

شاخهٔ آموزش فنی و حرفه‌ای

نظام جدید آموزش متوسطه

شمارهٔ درس ۲۰۹۳

۶۲۱ / ۳۸۱ / ۷۳۴الف ۱۳۸۴

الکترونیک عمومی (۱)/ مؤلفان: محمود همتایی... [و دیگران]. [ویرایش دوم]/ بازسازی و تجدیدنظر: کمیسیون برنامه‌ریزی و تألیف رشتهٔ الکترونیک. ـ تهران: شرکت چاپ و نشر کتابهای درسی ایران، ۱۳۸۴.

۲۱۶ ص.: مصور. ـ (آموزش فنی و حرفه‌ای؛ شمارهٔ درس ۲۰۹۳)

متون درسی رشته‌های الکترونیک ـ الکترونیک و مخابرات دریایی، زمینهٔ صنعت.

برنامه‌ریزی و نظارت، بررسی و تصویب محتوا: کمیسیون برنامه‌ریزی و تألیف کتابهای درسی رشتهٔ الکترونیک دفتر برنامه‌ریزی و تألیف آموزشهای فنی‌وحرفه‌ای و کاردانش وزارت آموزش و پرورش.

۱. الکترونیک. الف. همتایی، محمود. ب. ایران. وزارت آموزش و پرورش. دفتر برنامه‌ریزی و تألیف آموزشهای فنی‌وحرفه‌ای و کاردانش. ج. عنوان. د. فروست.

۱۳۸۴

همکاران محترم و دانش‌آموزان عزیز:

پیشنهادات و نظرات خود را دربارهٔ محتوای این کتاب به نشانی تهران ـ صندوق پستی شمارهٔ ۴۸۷۴/۱۵ دفتر برنامه‌ریزی و تألیف آموزشهای فنی و حرفه‌ای و کاردانش، ارسال فرمایند.

پست الکترونیکی	info@tvoccd.sch.ir
آدرس الکترونیکی	www.tvoccd.sch.ir

این کتاب با توجه به برنامهٔ سالی ـ واحدی در فروردین ماه سال ۱۳۷۹ توسط کمیسیون تخصصی برنامه‌ریزی و تألیف رشتهٔ الکترونیک بازسازی و تجدید نظر گردید. به منظور هماهنگی با سایر دروس یک فصل تحت عنوان «پیش‌نیاز» در ابتدای کتاب اضافه شده است و محتویات فصل ششم به‌طور کامل به سال سوم انتقال می‌یابد.

یکاهای اندازه‌گیری، علائم اختصاری و نقشه‌های موجود در این کتاب توسط کارشناسان متخصص مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران بررسی و به تأیید رسیده است.

وزارت آموزش و پرورش
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

برنامه‌ریزی محتوا و نظارت بر تألیف: دفتر برنامه‌ریزی و تألیف آموزشهای فنی و حرفه‌ای و کاردانش
نام کتاب: الکترونیک عمومی(۱) ـ ۳۵۹/۴۲
مؤلفان: مهندس محمود همتایی، مهندس فتح‌الله نظریان، مهندس ابوالقاسم جاریانی و مهندس سیدمحمود صموتی (فصل مقدماتی)
آماده‌سازی و نظارت بر چاپ: ادارهٔ کل چاپ و توزیع کتابهای درسی
صفحه‌آرا: فائزه محسن‌شیرازی
طراح جلد: علیرضا رضائی‌کُز
نشر: شرکت چاپ و نشر کتابهای درسی ایران: تهران ـ کیلومتر ۱۷ جادهٔ مخصوص کرج ـ خیابان ۶۱ (داروپخش)
تلفن: ۲ ـ ۶۰۲۶۲۴۱، دورنگار: ۶۰۲۶۲۴۰، صندوق پستی: ۱۳۴۲۵/۶۸۴
چاپخانه: مارگرافیک
سال انتشار: ۱۳۸۴

حق چاپ محفوظ است.

شابک ۱-۸۰۷-۰۵-۹۶۴ ISBN 964-05-0807-1

شما عزیزان کوشش کنید که از این وابستگی بیرون آیید و احتیاجات کشور خودتان را برآورده سازید، از نیروی انسانی ایمانی خودتان غافل نباشید و از اتکای به اجانب بپرهیزید.

امام خمینی «قدّس سرّه‌الشّریف»

فهرست

مقدمه ۱

سخنی با همکاران ارجمند و هنرجویان عزیز ۲

فصل مقدماتی : خلاصه ای از مفاهیم و قطعات اساسی الکترونیک ۳
۱ـ معرفی سیستمهای الکترونیکی ۴
۲ـ مدار الکتریکی و نقشه فنی ۶
۳ـ جریان الکتریکی ۹
۴ـ ولتاژ یا اختلاف پتانسیل الکتریکی ۱۶
۵ـ مقاومتهای الکتریکی ۲۰
۶ـ خازنها (Capacitor) ۳۱
۷ـ ترانسفورماتورها (Transformers) ۳۵
۸ ـ مبدلها (Transducer ـ ترانس دیوسر) ۳۹

فصل اول : بررسیهای کلی ۴۵
۱ ـ ۱ ـ مقدّمه ۴۵
۲ ـ ۱ ـ ظرفیّت لایه ۴۷
۳ ـ ۱ ـ لایه والانس و الکترون والانس ۴۷
۴ ـ ۱ ـ هدایت در اجسام ۴۸
۱ ـ ۴ ـ ۱ ـ هادیها ۴۸
۲ ـ ۴ ـ ۱ ـ نیمه هادیها ۴۸
۳ ـ ۴ ـ ۱ ـ عایقها ۴۹
۵ ـ ۱ ـ باندهای انرژی هادیها ، نیمه هادیها و عایقها ۴۹
۶ـ ۱ـ مقدمه ای بر لامپهای خلأ ۵۰
۱ ـ ۶ ـ ۱ ـ تجربه ای از ادیسون ۵۰
۲ ـ ۶ ـ ۱ ـ سحر و جادو در تجربه ادیسون ۵۱
۳ ـ ۶ ـ ۱ ـ علت عبور جریان از حباب خلأ چیست؟ ۵۱
۴ ـ ۶ ـ ۱ ـ تعویض قطبهای باتری ۵۲
۵ ـ ۶ ـ ۱ ـ نامگذاری حباب خلأ ۵۲
۶ ـ ۶ ـ ۱ ـ کاربرد لامپ دیود و تکامل لامپهای خلأ ۵۳

۷ـ۶ـ۱ـ خلاصه ای از ساختمان لامپ ترپود ۵۳
۸ـ۶ـ۱ـ جایگزینی نیمه هادیها به جای لامپهای خلأ ۵۴

فصل دوم : بررسی ساختمان نیمه هادیها و چگونگی تشکیل نیمه هادی نوع N و P ۵۷
۱ـ۲ـ انواع نیمه هادیها ۵۷
۲ـ۲ـ باندهای انرژی نیمه هادیها ۵۹
۳ـ۲ـ ساختمان اتمی ژرمانیم و سیلیکون ۵۹
۴ـ۲ـ ساختمان کریستالی ژرمانیم و سیلیسیم ۶۰
۵ـ۲ـ هدایت الکتریکی در سیلیسیم و ژرمانیم خالص ۶۱
۶ـ۲ـ تئوری حفره ها ۶۳
۷ـ۲ـ حرکت الکترونها و حفره ها داخل کریستال نیمه هادی ۶۳
۸ـ۲ـ نیمه هادی نوع N و P ۶۴
۱ـ۸ـ۲ـ ناخالص کردن کریستال نیمه هادی با اتم ۵ ظرفیتی ۶۵
۲ـ۸ـ۲ـ ناخالص کردن کریستال نیمه هادی با اتم ۳ ظرفیتی ۶۶

فصل سوم : دیود ۷۰
۱ـ۳ـ اتصال PN ۷۰
۲ـ۳ـ بایاس مستقیم و معکوس دیود ۷۳
۳ـ۳ـ جریان اشباع معکوس در دیود ۷۶
۴ـ۳ـ منحنی مشخصهٔ ولت ـ آمپر دیود معمولی ۷۷
۵ـ۳ـ علامت اختصاری و ساختمان ظاهری دیود معمولی ۷۸
۶ـ۳ـ بررسی دیود در حالت ایده آل ۸۰
۷ـ۳ـ مقاومت استاتیکی و دینامیکی دیود معمولی ۸۰
۸ـ۳ـ مدار معادل دیود معمولی ۸۴
۹ـ۳ـ مقادیر حد در دیودها ۸۴
۱ـ۹ـ۳ـ ماکزیمم ولتاژ معکوس مجاز (V_R) ۸۴
۲ـ۹ـ۳ـ ماکزیمم جریان مستقیم یا متوسّط دیود (I_F) ۸۴
۳ـ۹ـ۳ـ ماکزیمم جریان تکراری (I_{FRM}) ۸۵
۴ـ۹ـ۳ـ ماکزیمم جریان لحظه ای (I_{FSM}) ۸۶
۱۰ـ۳ـ امتحان کردن دیود با اهم متر ۸۶
۱۱ـ۳ـ انواع دیودهای نیمه هادی ۸۷

۱۲ـ۳ـ دیود اتصال نقطه‌ای ۸۷
۱۳ـ۳ـ دیود زنر ۸۹
۱ـ۱۳ـ۳ـ ساختمان دیود زنر ۸۹
۲ـ۱۳ـ۳ـ استاندارد ولتاژهای زنر ۹۰
۳ـ۱۳ـ۳ـ ضریب حرارتی دیود زنر ۹۰
۴ـ۱۳ـ۳ـ توان زنر ۹۱
۵ـ۱۳ـ۳ـ مدار معادل دیود زنر ۹۱
۶ـ۱۳ـ۳ـ کاربردهای دیود زنر ۹۱
۱۴ـ۳ـ دیود نوردهنده (LED) ۹۵
۱۵ـ۳ـ دیود خازنی (واراکتور) ۹۸
۱۶ـ۳ـ دیود تونلی ۱۰۰
۱۷ـ۳ـ فتو دیود ۱۰۲

فصل چهارم : کاربرد دیودها (یکسوسازی ، چند برابر کنندگی و تغییر دهندگی شکل موج) ۱۰۶
۱ـ۴ـ مقدّمه ۱۰۶
۲ـ۴ـ مدارات یکسوکننده های دیودی ۱۰۷
۱ـ۲ـ۴ـ مدار یکسوکنندهٔ نیم موج ۱۰۷
۲ـ۲ـ۴ـ مدار یکسوکنندهٔ تمام موج با ترانس سرووسط ۱۱۱
۳ـ۲ـ۴ـ مدار یکسوکننده تمام موج پل ۱۱۴
۳ـ۴ـ مقایسه مدار یکسوکنندهٔ تمام موج و پل ۱۱۶
۴ـ۴ـ صافیها ۱۱۷
۵ـ۴ـ مدارات چند برابرکنندهٔ ولتاژ ۱۲۰
۱ـ۵ـ۴ـ مدارات دوبرابرکنندهٔ ولتاژ ۱۲۱
۲ـ۵ـ۴ـ مدارات سه و چهار برابرکنندهٔ ولتاژ ۱۲۵
۶ـ۴ـ برش دهنده‌ها ۱۲۶
۱ـ۶ـ۴ـ مدار برش دهنده مثبت ۱۲۶
۲ـ۶ـ۴ـ مدار برش دهنده منفی ۱۲۷
۳ـ۶ـ۴ـ مدار برش دهنده دو طرفه ۱۲۷
۷ـ۴ـ مهار کننده‌ها ۱۲۹
۸ـ۴ـ نامگذاری دیودها ۱۳۱

۱ـ۸ـ۴ـ روش ژاپنی ۱۳۱
۲ـ۸ـ۴ـ روش اروپایی ۱۳۲
۳ـ۸ـ۴ـ روش آمریکایی ۱۳۲
۹ـ۴ـ به دست آوردن مقادیر حد از روی جدول ۱۳۳

فصل پنجم : ترانزیستور ۱۳۷
۱ـ۵ـ تاریخچه اختراع ترانزیستور ۱۳۸
۲ـ۵ـ برتریهای ترانزیستور بر لامپهای الکترونی ۱۳۹
۳ـ۵ـ ساختمان ترانزیستور ۱۴۰
۴ـ۵ـ معادل دیودی ترانزیستور ۱۴۲
۵ـ۵ـ عملکرد ترانزیستور ۱۴۲
۱ـ۵ـ۵ـ بایاسینگ ترانزیستور ۱۴۲
۲ـ۵ـ۵ـ چگونگی عمل تقویت کنندگی ترانزیستور ۱۴۵
۳ـ۵ـ۵ـ نمای سمبلیک ترانزیستور ۱۴۸
۴ـ۵ـ۵ـ جهت جریانها در ترانزیستور ۱۴۸
۵ـ۵ـ۵ـ تأثیر درجهٔ حرارت در ترانزیستور ۱۴۹
۶ـ۵ـ۵ـ نامگذاری ولتاژهای ترانزیستور ۱۴۹
۶ـ۵ـ آرایشهای ترانزیستور ۱۵۰
۷ـ۵ـ منحنیهای مشخصه ترانزیستور ۱۵۲
۸ـ۵ـ تأمین ولتاژها و جریانهای مورد نیاز ترانزیستور ۱۵۷
۹ـ۵ـ نقطهٔ کار و خط بار ۱۵۹
۱۰ـ۵ـ بررسی روابط بین جریانها و ولتاژها در ترانزیستور ۱۶۳
۱۱ـ۵ـ محاسبه روابط α و β و γ بر حسب یکدیگر ۱۶۳
۱۲ـ۵ـ تغذیه ترانزیستور : (مستقیم ، اتوماتیک ، سرخود) ۱۶۴
۱۳ـ۵ـ پایداری حرارتی ۱۶۹
۱۴ـ۵ـ بررسی مدار عملی و مشخصات یک تقویت کننده ۱۷۵
۱۵ـ۵ـ بررسی تقویت یک سیگنال الکتریکی از روی منحنیهای مشخصه ۱۷۷
۱۶ـ۵ـ مقادیر حد در ترانزیستورها ۱۷۸
۱۷ـ۵ـ نامگذاری ترانزیستورها ۱۷۹
۱۸ـ۵ـ به دست آوردن مقادیر حد از جدول ۱۸۲

فصل ششم : تقویت کننده‌های ترانزیستوری ۱۸۵
۱ـ۶ـ کاربرد فرکانس ۱۸۵
۲ـ۶ـ کمیّت مورد تقویت ۱۸۶
۳ـ۶ـ بررسی تقویت کننده‌های کلاس A ، B ، AB ، C ۱۸۶
۴ـ۶ـ بررسی مدار معادل AC یک تقویت کننده ۱۸۸
۵ـ۶ـ تجزیه و تحلیل تقویت کننده‌ها با استفاده از مدار معادل h ۱۹۶
۶ـ۶ـ بررسی تقویت کننده امیتر مشترک (CE) ۲۰۵
۷ـ۶ـ بررسی تقویت کننده بیس مشترک ۲۰۸
۸ـ۶ـ بررسی تقویت کننده کلکتور مشترک ۲۰۹
۹ـ۶ـ کاربرد ۲۱۱

منابع و مآخذ مورد استفاده ۲۱۶

مقدمه

سالهاست کـه واژهٔ «الکترونیک» به طور مکرر در میان مردم استـفاده می شود بطوری که هرشخصی برداشت انفرادی خود را ازاین علم و یا موارد کاربردی آن مطرح می کند ، امّا به صورت کلی عمدتاً تعاریف و برداشتهایی که از این واژه عنوان می شود کامل نبوده و برداشتهای ظاهری عـملاً نمی تواند اهمیت و نفوذ روز افزون الکترونیک را در ارتباط با صنایع گوناگون بیان کند .

«الکترونیک» به طیف گـسترده ای از الکتریـسیته اطلاق می شود کـه با حرکت الکترونها در انواع مدارات نیمه هادی سروکار دارد ، اختراع IC ها سبب آن شده است که دگرگونی های فراوانی در این علم پدیدار گـشته و سیـستم های مـدرن الکترونیکی از جمله مدارهای کنترل از راه دور ، ماهواره های فضایی ـ ربانها و . . . را پدید آورد .

در حال حاضـر الکترونیک کلید فتح شـگفتیهای جـهان است و با تمام علوم و فنون موجود به نحوی پیـوند خورده است . از وسـایل ساده خـانگی تا پیچیده ترین تکنیکهـای فضایی همـه جا صحـبت از تکنولوژی فراگیر الکترونیکی است و امروز صنعت مـدرن بدون الکترونیک و تکنولوژی هـای وابسته بـه آن عملاً مطـرود و از کار افتاده است .

کتاب حاضر بر اساس مصوبات کمـیسیون تخصصی رشته الکترونیک و تحت عنوان کـتاب «الکتـرونیک عمـومی» بر اساس اهداف رفـتاری مـصوب کـمیـسیون تخصـصی رشتـه مذکـور به مرحلهٔ تدوین و نگارش درآمـده است و از آنجایـی که این کتـاب به عنوان «کتاب مـرجع» در فراگیـری اصول الکتـرونیکی در نظر گرفتـه شده است ، به هنگام نگارش فصول سعی بر آن بوده است کـه به زبانی ساده مفاهیم اساسی و قطعات و مدارات رایج در دستگاههای الکترونیکی برای دانش آموزان رشته های برق و الکترونیک تشریح شود .

مولفین کتاب را عقیده بر آن است که تجارب ارزندهٔ مدرسین می تواند در بهبود کیفی مطالب مفید واقع شده و سطح علمی در روش تألیف کتاب را اعتلاء بخشد ، لذا تقـاضا دارد کـه همکاران محـترم نظرات و پیـشنهادات ارزنده خـود را به آدرس دفـتر تألیف و برنامه ریزی درسی معاونت آموزش متوسطه ارسال دارند تا در چاپ های بعدی مورد بازنگری و ملاحظه قرار گیرد .

با تشکر : مؤلفان

سخنی با همکاران ارجمند و هنرجویان عزیز

کتاب الکترونیک عمومی ۱، به ارزش دو واحد درسی، به روش سالی واحدی تدریس می شود. به منظور استفاده مطلوب از کتاب، توجه همکاران ارجمند و هنرجویان عزیز را به موارد زیر جلب می نماید:

۱ـ قبل از شروع هر فصل هدفهای رفتاری را دقیقاً مطالعه نمایید.

۲ـ فصلی با عنوان فصل مقدماتی که حاوی مطالب عمومی برق و الکترونیک است به کتاب اضافه شده است. تدریس این فصل ضروری است و مانند سایر قسمتهای کتاب مورد ارزشیابی نهایی قرار می گیرد.

۳ـ مطابق جدول ضمیمه، قسمتهایی از کتاب برای مطالعه آزاد درنظر گرفته شده است. بهتر است قبل از تدریس کتاب، این قسمتها را مشخص کنید. از این قسمتها سؤالات امتحانی طرح نخواهد شد.

۴ـ هدف از تدریس کتاب، آموزش مفاهیم و تحلیل فیزیکی است، لذا پرداختن به مباحث ریاضی سنگین و خارج از کتاب ضرورتی ندارد.

۵ـ با توجه به جدید بودن مبحث درسی کتاب «الکترونیک عمومی ۱» در سال دوم، سؤالات متعددی برای هنرجویان مطرح می شود که پاسخ دادن به آنها با توجه به محدودیت زمانی و پایه تحصیلی، در جلسات درسی میسر نیست. بدیهی است به بسیاری از سؤالات در کتاب «الکترونیک عمومی ۲» که در سال سوم تدریس می شود پاسخ داده خواهد شد.

لذا به هنرجویان عزیز و همکاران ارجمند توصیه می نماییم از پرداختن به مطالب خارج از مباحث درسی که موجب اتلاف وقت و تأخیر در پیشرفت تدریس کتاب براساس برنامه زمان بندی شده می شود، خودداری نمایند.

هدف کلی درس

آشنایی با مبانی الکتریسیته و اصول الکترونیک، شناسایی قطعات و المانهای الکترونیکی، مدارات دیودی و تقویت کننده های ترانزیستوری.

فصل مقدماتی

خلاصه‌ای از مفاهیم و قطعات اساسی الکترونیک

هدفهای رفتاری: فراگیر در پایان این فصل خواهد توانست:

۱ـ تعدادی از علائم فنی و قطعات الکتریکی و الکترونیکی را از یکدیگر تمیز دهد.

۲ـ مدار الکتریکی را تعریف کند و اجزای آن را نام ببرد.

۳ـ جریان الکتریکی را تعریف کند، جهت آن را مشخص نماید و واحد آن را نام ببرد.

۴ـ سه نوع جریان مستقیم ثابت، مستقیم متغیر و متناوب را تعریف کند.

۵ـ مدار سری و مدار موازی را شرح دهد.

۶ـ فرکانس و زمان متناوب را تعریف کند و روابط بین این دو را بنویسد.

۷ـ بارهای الکتریکی را باتوجه به ساختمان اتم تعریف کند.

۸ـ نحوهٔ تولید الکتریسیته ساکن را شرح دهد.

۹ـ ولتاژ یا اختلاف پتانسیل را تعریف کند و اختلاف پتانسیل دوسر هر جزء مدار را محاسبه کند.

۱۰ـ مقاومت الکتریکی، واحد و توان آن را تعریف کند و انواع مقاومتها را از یکدیگر تمیز دهد.

۱۱ـ خازن و ظرفیت آن را تعریف کند، انواع خازن را از یکدیگر تمیز دهد و نحوهٔ شارژ و دشارژ خازنها را شرح دهد.

۱۲ـ انواع ترانسفورماتورها را از یکدیگر تمیز دهد و روابط ورودی و خروجی ترانسفورماتورها را بیان کند.

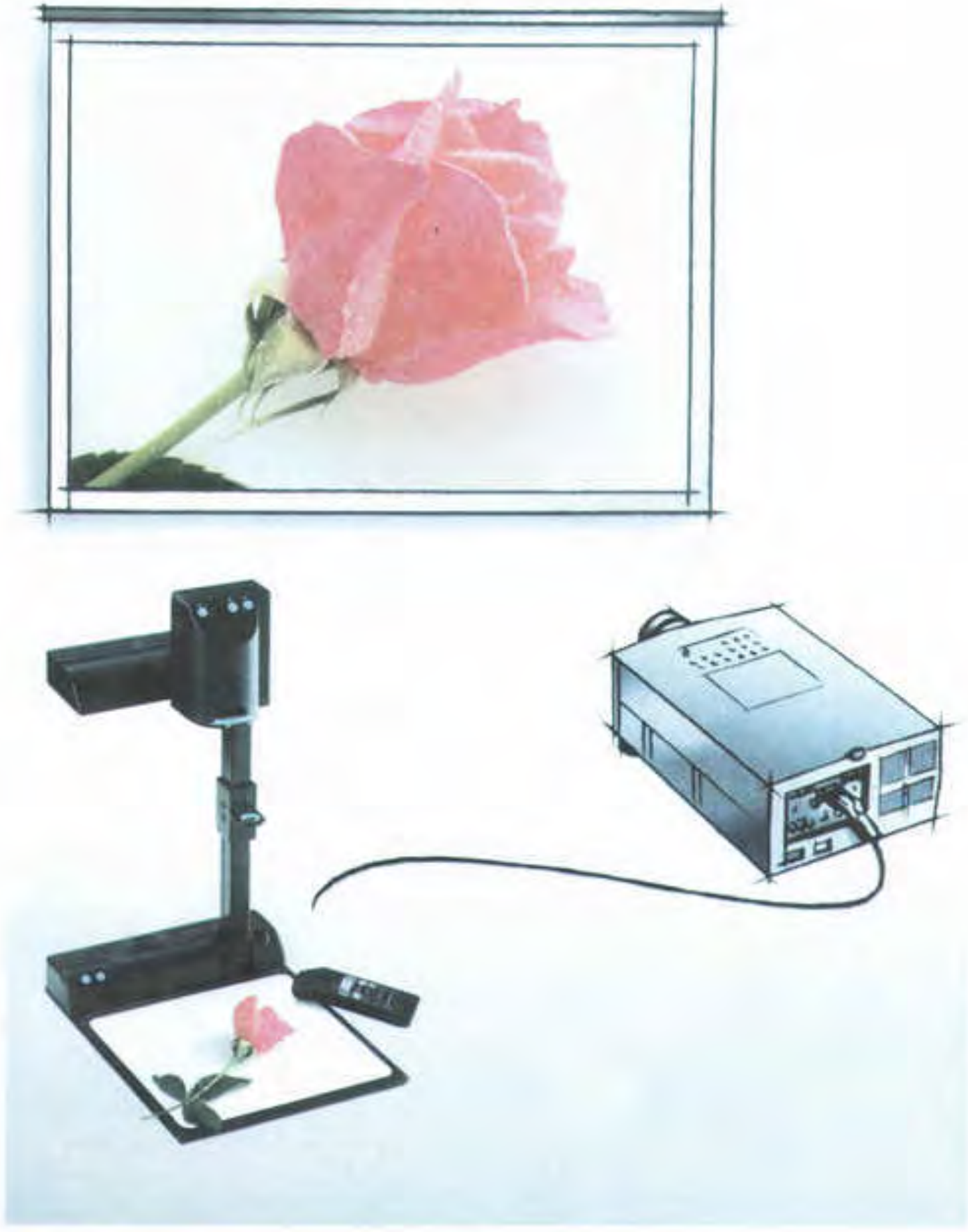
۱۳ـ مبدلها را تعریف کند و انواع مبدلهای ورودی و خروجی را نام ببرد.

۱ـ معرفی سیستمهای الکترونیکی

هدف از این فصل آشنا نمودن هنرجویان با تعدادی از مفاهیم و تعاریف علم الکترونیک و نیز آشنا ساختن آنان با قطعات الکترونیکی است. به (شکل ۱) نگاه کنید. دستگاههایی را می بینید که در آنها از مدارهای الکترونیکی استفاده شده است.

امروزه علم الکترونیک بسیار گسترش یافته و کلیه صنایع سنگین و سبک از قبیل کارخانه های ذوب آهن، اتومبیل سازی، لوازم پزشکی، پوشاک، وسایل خانگی و ... را تحت تأثیر خود قرار داده است. آشنایی با مفاهیم اولیهٔ این علم و شناختن قطعات اساسی مورد استفاده در آن برای تکنسینهای برق و الکترونیک ضروری است و می بایستی با دقت کامل به فراگیری آنها بپردازند.

شکل (۱ـ الف)



شکل (۱ـ ب)

شکل (۱ـج)

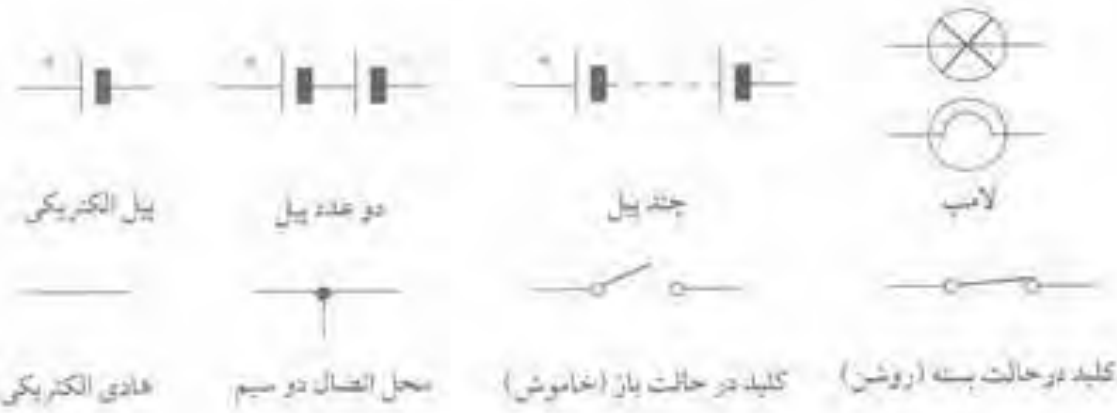
۲ـ مدار الکتریکی و نقشهٔ فنی

شما در دورهٔ راهنمایی تحصیلی و سپس در سال اول دبیرستان، با برخی از مولّدهای الکتریسیته و قطعات مورد استفاده در صنعت برق آشنا شده اید. این را نیز می دانید که انرژی الکتریکی را می توان از تبدیل سایر انرژیها از قبیل انرژی مکانیکی، نورانی، حرارتی، شیمیایی و ... بدست آورد. یکی از منابع متداول برای تولید انرژی الکتریکی پیل یا باتری است. در پیل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. برای استفاده از انرژی الکتریکی می بایستی مدار الکتریکی تشکیل شود.

یک مدار الکتریکی معمولاً شامل اجزا یا قطعاتی مانند مقاومت، لامپ، ترانزیستور، دیود و ... است. هر مدار به یک منبع تغذیهٔ الکتریکی مانند باتری متصل می شود. سیم ها، یا نوارهای ارتباط دهندهٔ مدار، از یک مادهٔ هادی الکتریسیته خوب مانند مس تشکیل می شوند.

وقتی می گوییم یک مدار الکتریکی تشکیل شده است که اتصال دهنده‌ها و سایر قطعات، یک حلقه بسته را به‌وجود آورده باشند، تنها در این صورت است که جریان برق برقرار می شود.

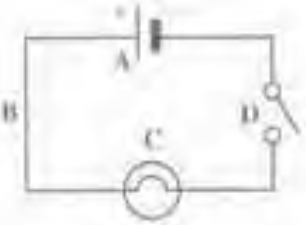
قطعات مدارهای الکتریکی را با علائم یا نشانه هایی نمایش می دهند. بدین ترتیب که برای هر قطعه یا هر اتصال دهنده یک علامت اختصاری فنی خاص تعریف می کنند. در شکل (۲) نمونه هایی از این علائم را مشاهده می کنید.



شکل (۲) تعدادی از علائم اختصاری الکتریکی

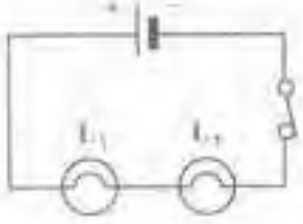
پرسش

۱ـ در مدار سادهٔ الکتریکی شکل (۳) نام هریک از علائم اختصاری فنی A، B، C و D چیست؟



شکل (۳)

۲ـ در مدار شکل (۴)، دو عدد لامپ L_1 و L_2 به‌صورت سری (دنبال هم ـ پشت سرهم) وصل شده اند. در این مدار یک باتری و یک کلید بسته نیز وجود دارد. اگر لامپ L_1 بسوزد چه اثری روی لامپ L_2 می گذارد؟

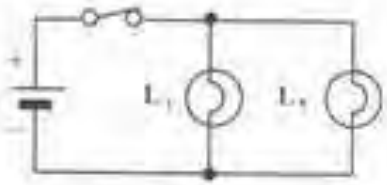


شکل (۴)

۳ـ در شکل (۵) لامپهای L_1 و L_2 به صورت موازی بسته شده اند (لامپها در کنارهم) و هر دو عدد لامپ توسط یک کلید خاموش یا روشن می شود:

الف: درصورتی که لامپ L_2 بسوزد چه اثری روی لامپ L_1 می گذارد؟

ب: یک بار دیگر مدار را طوری رسم کنید که هر لامپ دارای کلید جداگانه ای باشد.



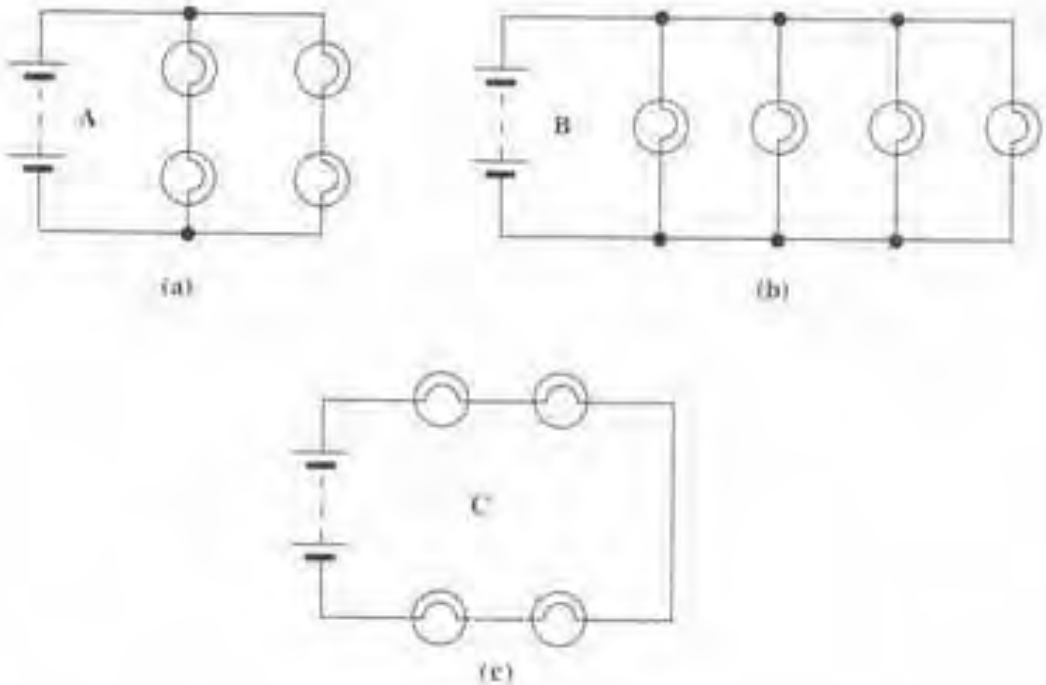
شکل (۵)

۴ـ در شکل (۶)، اگر در هریک از مدارهای a ـ b ـ c یک لامپ بسوزد، پاسخ سؤال های زیر چه خواهد بود؟

a: در کدام مدار فقط یک لامپ خاموش می شود؟

b: در کدام مدار فقط دو لامپ خاموش می شود؟

c: در کدام مدار هر چهار لامپ خاموش می شود؟

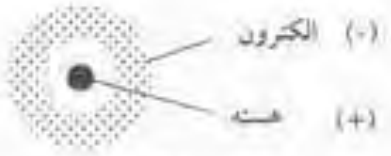


شکل (۶)

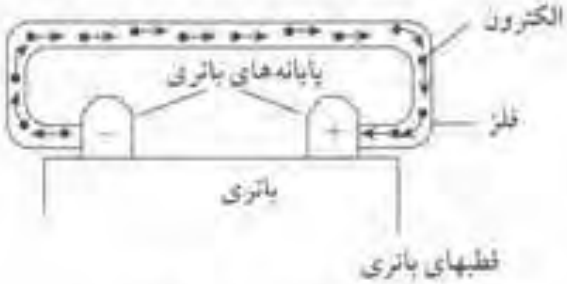
۳ـ جریان الکتریکی

جریان الکتریکی چیست؟ می دانید که هر اتم از اجزای بسیار کوچکی به نام هسته و الکترون تشکیل شده است. هسته در مرکز اتم قرار دارد و دارای بار الکتریکی مثبت است، ولی الکترونها که در اطراف هسته دوران می نمایند دارای بارالکتریکی منفی هستند. بار الکتریکی منفی الکترونها با بار الکتریکی مثبت هسته برابر است. به همین دلیل اتم از نظر بارالکتریکی خنثی است، چون بار الکتریکی الکترونها منفی و بار الکتریکی هسته مثبت است. الکترونها و هسته به یکدیگر نیروی جاذبه وارد می کنند شکل(۷).

در اجسامی که هادی الکتریسیته اند، نیروی جاذبهٔ واردشده ازطرف هسته به تعدادی از الکترونها کم است، به طوری که اگر این هادیها به عنوان قسمتی از مدار الکتریکی به باتری متصل شوند، نیروی باتری سبب حرکت الکترونها از قطب منفی باتری (−) به طرف قطب مثبت آن (+) می شود شکل(۸).



شکل(۷) ساختمان اتم



شکل (۸)جریان الکتریکی

جهت جریان الکتریکی: قبل از کشف الکترون، دانشمندان تصور می کردند که در یک باتری، بارهای مثبت از قطب مثبت باتری به سمت قطب منفی باتری حرکت می کنند. چون در بسیاری از کتابهای درسی جهت جریان الکتریکی را به همین ترتیب، یعنی از قطب مثبت به قطب منفی درنظر گرفته اند، این جهت جریان هنوز بعنوان جهت قراردادی جریان الکتریکی مورد قبول است و همچنان مورد استفاده قرار می گیرد. در شکل(۹)، جهت قراردادی جریان یعنی حرکت بارهای مثبت

شکل (۹) جهت قراردادی جریان

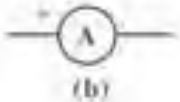
از قطب مثبت به منفی را نشان می دهد. اکنون دیگر باید متوجه شده باشید که درواقع الکترونها هستند که از قطب منفی به طرف قطب مثبت باتری حرکت می کنند و بارهای مثبت عملاً حرکتی ندارند و جهت تعریف شده کاملاً فرضی و قراردادی است.

آمپر و آمپرمتر: شدت جریان الکتریکی را با حرف لاتین I نشان می دهند و واحد آن را آمپر[1] می نامند که با حرف A نشان داده می شود. جریان الکتریکی که از لامپ یک چراغ قوهٔ بزرگ می گذرد حدوداً ۰٫۵ آمپر و جریان عبوری از یک لامپ چراغ جلوی خودرو حدود سه تا چهار آمپر است.

برای اندازه گیری شدت جریان الکتریکی از آمپرمتر استفاده می کنند. در شکل (a ـ ۱۰) یک دستگاه آمپرمتر نشان داده شده است و در شکل (b ـ ۱۰) نیز علامت فنی آمپرمتر را مشاهده می کنید. پایانه ای که با علامت مثبت یا رنگ قرمز مشخص شده است به سمت قطب مثبت باتری و پایانه ای که با علامت منفی یا رنگ مشکی مشخص شده در مسیر عبور جریان به سمت قطب منفی هدایت می شود. درصورتی که در جریان مستقیم قطب های (پایانه های) آمپرمتر بطور نادرست به مدار متصل شود، عقربه در جهت مخالف حرکت می کند و ممکن است به آمپرمتر آسیب وارد شود.

واحد کوچکتر از آمپر را میلی آمپر می نامند و آن را با mA نشان می دهند. میلی آمپر برابر با $\frac{۱}{۱۰۰۰}$ آمپر است. $۱mA = \frac{۱}{۱۰۰۰}A$ یا $۱۰۰۰mA = ۱A$

(a)



(b)

شکل (۱۰) آمپرمتر

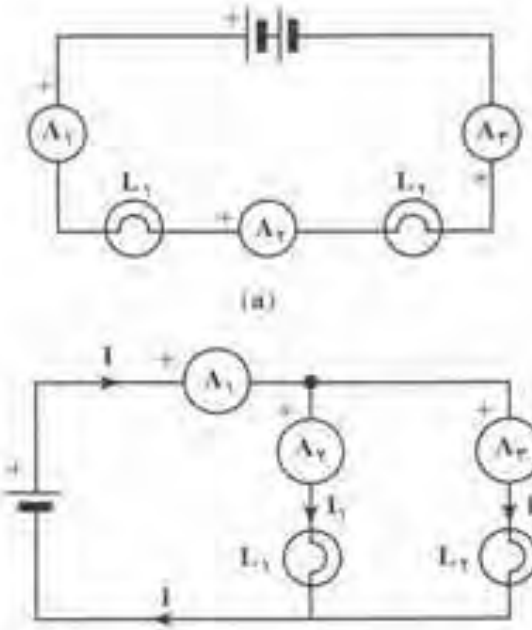
۱ـ اگر در یک ثانیه از یک نقطهٔ سیم یک کولن الکتریسیته در جهت مشخص عبور کند شدت جریان عبوری یک آمپر است.

چگونگی اندازه گیری شدت جریان الکتریکی: برای اندازه گیری شدت جریان الکتریکی در مدار، باید ابتدا قسمتی از مدار را قطع کنیم سپس آمپرمتر را به صورت سری در حد فاصل بریدگی ایجاد شده قرار دهیم. این گونه اتصال را اتصال سری می نامند. توجه داشته باشید که نصب آمپرمتر در مدار به این شکل، درست مانند قراردادن یک کلید به صورت سری در مدار است.

الف- مدار سری: در شکل (a-۱۱)، لامپهای L_1 و L_2 به صورت سری بسته شده اند و شدت جریانی که آمپرمترهای A_1، A_2 و A_3 نشان می دهند، یکسان هستند. در این مدار آمپرمترها نیز به صورت سری در مدار قرار گرفته اند. پس دانستید که در مدار سری، جریان عبوری در کلیهٔ نقاط مدار یکسان است.

ب- مدار موازی: در شکل (b-۱۱) لامپهای L_1 و L_2 به صورت موازی قرار گرفته اند. در این مدار برای هر لامپ مسیر جریان جداگانه ای وجود دارد. اگر شدت جریان کل مدار برابر با I باشد، این جریان بین دو لامپ تقسیم می شود و جریانهای I_1 و I_2 را تشکیل می دهد. به عبارت دیگر جریانی که آمپرمتر A_1 نشان می دهد برابر است با مجموع جریانهایی که آمپرمترهای A_2 و A_3 نشان می دهند:

$$I = I_1 + I_2$$



شکل (۱۱) مدار سری و موازی

مثال: در صورتی که $I_1 = ۰/۱A$ و $I_2 = ۰/۳A$ باشد، مقدار I چقدر است؟

$$I = I_1 + I_2 = ۰/۳ + ۰/۱ = ۰/۴A \qquad \boxed{I = ۰/۴A}$$

باتوجه به مثال بالا، ملاحظه می کنید که هیچ وقت جریان الکتریکی در مدار مصرف نمی شود، بلکه فقط جاری می شود.

جریان مستقیم (Direct current)

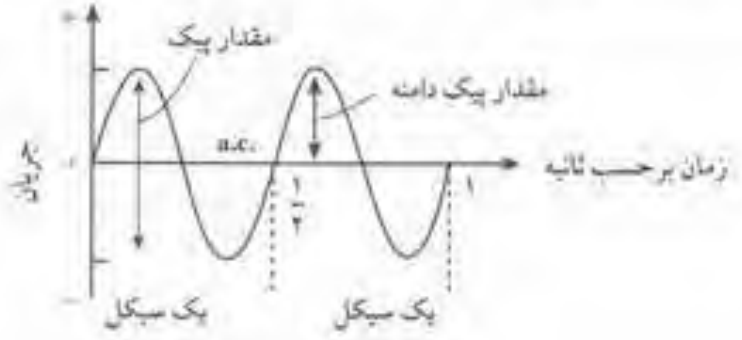
جریان مستقیم (یک طرفه) یا dc، عبارت از جریانی است که فقط در یک جهت جاری شود. بعنوان مثال، باتریها مولد جریان مستقیم هستند.

شکل موج جریان را می توان روی محورهای مختصات به صورت نمودار نشان داد. با استفاده از شکل موج می توان تغییرات جریان را نسبت به زمان مشاهده کرد. درشکل (a ـ ۱۲)، شکل موج جریان مستقیم ثابت و درشکل (b ـ ۱۲) شکل موج جریان مستقیم متغیر را ملاحظه می کنید.

شکل (۱۲) جریان مستقیم (dc)

جریان متناوب (Alternating current)

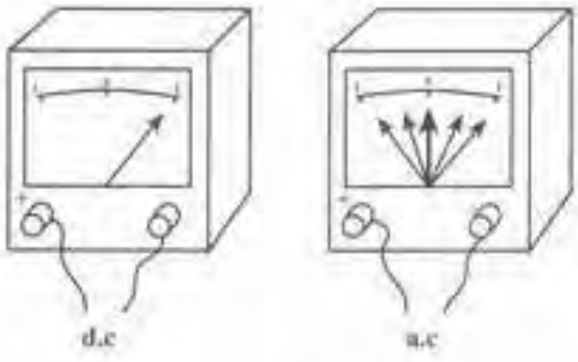
جریان متناوب یا ac جریانی است که جهت و مقدار آن با زمان به صورتی یکنواخت تغییر می کند. برق مصرفی منازل که در نیروگاهها تولید می شود، جریان متناوب است. در شکل (۱۳) یک نمونه جریان متناوب سینوسی را مشاهده می کنید. در این شکل جریان که در ابتدا صفر



شکل (۱۳) جریان متناوب

است در جهت مثبت افزایش یافته و به مقدار حداکثر (بیشینه) می رسد سپس مجدداً صفر می شود و در جهت منفی به بیشترین مقدار افزایش می یابد و بار دیگر به صفر می رسد. این مراحل با گذشت زمان تکرار می شود. شروع یک موج تا شروع تکرار بعدی را دورهٔ تناوب یا سیکل می نامند. در مدارهای الکتریکی، جریان ac را با علامت اختصاری فنّی ∿ نشان می دهند.

در شکل (۱۴) عبور جریان dc و ac از آمپرمتر نشان داده شده است. هنگام عبور جریان dc از آمپرمتر (a) عقربه در یک جهت منحرف شده و ثابت باقی می ماند. درصورتی که از همین آمپرمتر جریان متناوب عبور کند، چنانچه سرعت تغییرات جریان کم (حداکثر ۱۰ بار در ثانیه) باشد،



شکل (۱۲) مقایسه جریان ac و dc روی آمپرمتر

ابتدا عقربه به یک طرف منحرف می شود و با تغییر جهت جریان مجدداً به صفر می رسد و در جهت مخالف حرکت می کند. به عبارت دیگر با تغییر جهت جریان عقربه نیز روی صفحه تغییر مکان می دهد. درصورتی که سرعت تغییر جهت جریان زیاد باشد عقربه هیچگونه حرکتی را نشان نخواهد داد. این آزمایش تنها با استفاده از آمپرمتر با صفر وسط امکان پذیر است.

بخاری برقی، اجاق برقی و لامپ های رشته ای از وسایلی هستند که می توانند با هر دو نوع جریان ac و dc کار کنند، حال آن که اغلب دستگاههای الکترونیکی نیاز به جریان dc دارند.

فرکانس (بسامد) جریان متناوب: در جریان متناوب تعداد دوره های تناوب یا سیکلها را در یک ثانیه فرکانس می نامند و آن را با F نشان می دهند. واحد فرکانس هرتز (Hertz) یا سیکل بر ثانیه است و با علامت اختصاری Hz نشان داده می شود. مثلاً جریان ac نشان داده شده در شکل (۱۳)، در مدت یک ثانیه دو سیکل را طی می کند، بنابراین فرکانس آن دوهرتز است. F = ۲Hz

زمان یک دوره تناوب را پریود (Period) یا زمان تناوب می نامند و آن را با T نشان می دهند و برحسب ثانیه بیان می شود. T عکس فرکانس است.

$$T = \frac{1}{F} \text{ یا } F = \frac{1}{T}$$

بنابراین زمان تناوب یا پریودِ شکل موج نشان داده شده در شکل(۱۳) برابر است با

$$T = \frac{1}{F} = \frac{1}{2} = 0/5 \text{ ثانیه}$$

فرکانس جریان برق تولید شده در نیروگاهها برای مصارف برق خانگی برابر با ۵۰ هرتز و زمان تناوب آن $\frac{1}{50}$ یا ۲۰ میلی ثانیه است. برای اندازه گیری فرکانس از واحدهای بزرگتر یعنی کیلوهرتز (KHz) و مگاهرتز (MHz) نیز استفاده می کنند.

$$1KHz = 1000Hz \quad ، \quad 1MHz = 1,000,000Hz$$

فرکانس صوتی Audio Frequency (AF): امواج صوتی (قابل شنیدن) درصورتی تولید می شود که جریان الکتریکی در محدوده ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز از بلندگو عبور کند. بنابراین فرکانسهای در محدودهٔ فوق را فرکانسهای صوتی می نامند.

فرکانس رادیویی Radio Frequency (RF): جریانهایی که دارای فرکانسهایی بیشتر از ۳۰ کیلوهرتز هستند هنگام عبور از آنتن می توانند امواج رادیویی تولید نمایند.

یک مدار الکترونیکی که نوسانساز یا اُسیلاتور (Oscillator) نامیده می شود می تواند جریانهای AF (صوتی) و RF (رادیویی) تولید کند.

بارهای الکتریکی ساکن (استاتیک)

بارهای الکتریکی ثابت را که نمی توانند حرکت کنند، بارهای ساکن یا استاتیک می نامند. بارهای ساکن را می توان توسط مواد عایق مانند پلاستیک تولید کرد. مثلاً اگر یک قطعه کائوچو را به یک پارچهٔ پشمی مالش دهیم، الکترونهای پارچه به کائوچو انتقال یافته و روی آن تجمع می کنند. در این حالت پارچه پشمی دارای بار مثبت و قطعهٔ کائوچو دارای بار منفی شده است (شکل ۱۵). روشن است که علت مثبت شدن پارچهٔ پشمی، ازدست دادن الکترون و علت منفی شدن قطعهٔ کائوچو به دست آوردن الکترون است.

شکل (۱۵) بارالکتریکی ساکن

بارهای الکتریکی ساکن ایجاد جرقه و شکستگی در اجسام می کنند. هنگام بیرون آوردن لباسهای پلاستیکی از بدن، در آنها بار الکتریکی ساکن ذخیره می شود و جرقه می زنند. این نکته را به خاطر بسپارید که:

بارهای هم نام (⊕ و ⊕ یا ⊖ و ⊖) یکدیگر را دفع می کنند.
بارهای غیرهمنام (⊕ و ⊖) یکدیگر را جذب می کنند.

پرسش

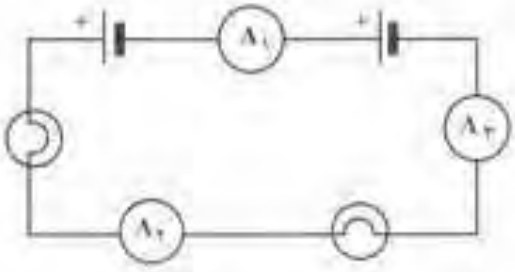
۱ـ الف: در شکل (a ـ ۱۱) اگر آمپرمتر A_1 مقداری برابر با ۰/۲ آمپر را نشان دهد، آمپرمترهای A_2 و A_3 چه مقادیری را نشان خواهند داد؟

ب: در شکل (b ـ ۱۱) اگر آمپرمتر A_2 مقداری برابر با ۰/۳ آمپر و آمپرمتر A_3 مقداری برابر با ۰/۲ آمپر را نشان دهد، آمپرمتر A_1 چه مقداری را نشان خواهد داد؟

۲ـ در شکل (b ـ ۱۱) اگر لامپهای L_1 و L_2 دقیقاً مشابه باشند و آمپرمتر A_1 مقداری برابر با ۰/۴ آمپر را نشان دهد، آمپرمترهای A_2 و A_3 چه مقداری را نشان می دهند؟

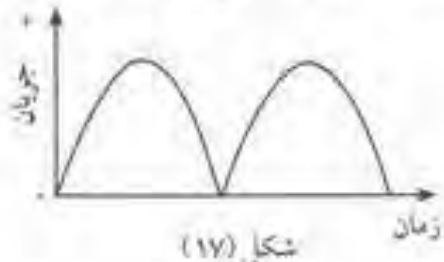
۳ـ الف: اگر در شکل (۱۶) آمپرمتر A_1 مقداری برابر با ۰/۳ آمپر را نشان دهد، آمپرمترهای A_2 و A_3 چه مقادیری را نشان خواهند داد؟

ب: در شکل (۱۶)، پایانه های (قطبین) صحیح آمپرمترهای A_1، A_2 و A_3 را مشخص کنید.



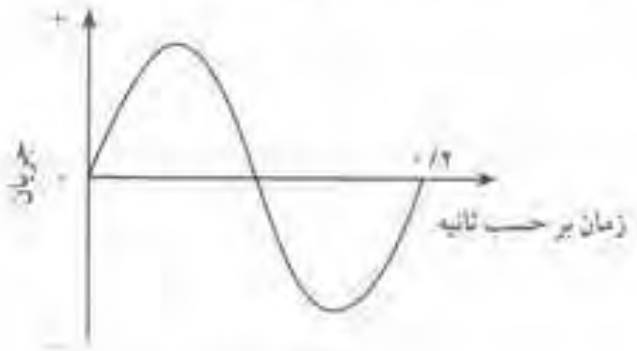
شکل (۱۶)

۴ـ شکل موج نشان داده شده در (شکل ۱۷)، ac است یا dc؟ شرح دهید.



شکل (۱۷)

۵ـ پریود (زمان تناوب) و فرکانس سیگنال ac نشان داده شده در شکل (۱۸) چقدر است؟



شکل (۱۸)

۶ـ جریانهای الکتریکی ۱A، ۰/۵A و ۰/۰۲A را به میلی آمپر تبدیل کنید.

۷ـ جریانهای ۱۵۰۰mA، ۳۰۰mA و ۶۰mA را به آمپر تبدیل کنید.

۴ـ ولتاژ یا اختلاف پتانسیل الکتریکی

ولتاژ یا اختلاف پتانسیل الکتریکی، کمیتی است که جریان الکتریکی را بوجود می آورد. ولتاژ یک باتری یا یک مولد عبارت از کمیتی است که الکترونها را در مدار الکتریکی به حرکت درمی آورد.

واحد ولتاژ ولت است. ولتاژ را با ولت متر اندازه می گیرند و با علامت V نشان می دهند.

ولتاژ پیل خشک نشان داده شده در شکل (a- ۱۹) ۱/۵ ولت است. در صورتی که دو پیل طبق شکل (b- ۱۹) به صورت سری بسته شوند، یعنی قطب (پایانه) منفی یک پیل به قطب مثبت پیل دوم متصل شود، ولتاژ مجموعهٔ سری پیل ها ۳ = ۱/۵×۲ ولت خواهد شد.

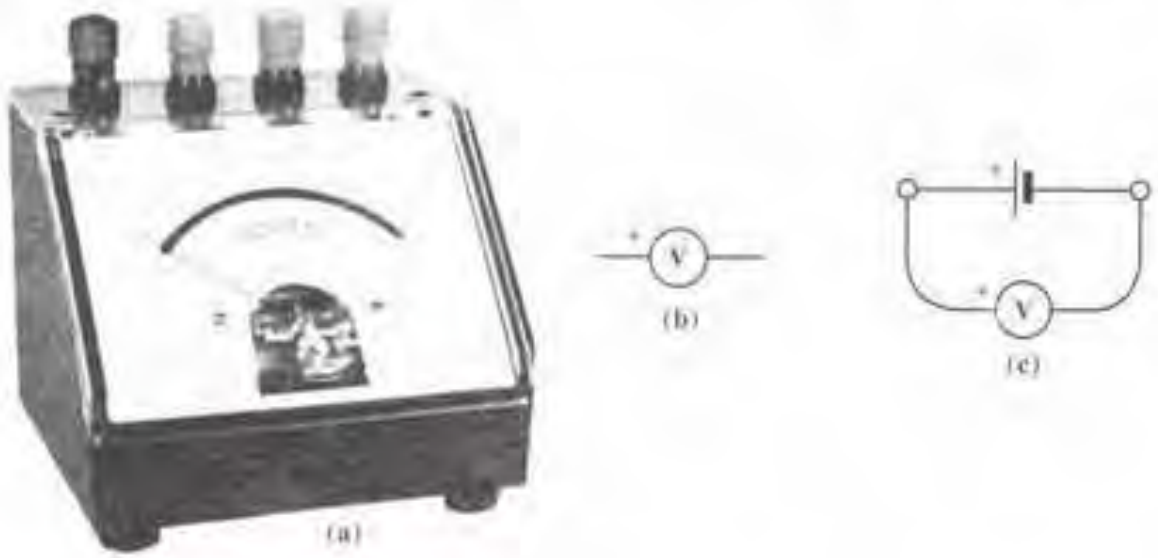
در باتری ۹ ولتی نشان داده شده در شکل (c-۱۹)، ۶ عدد پیل ۱/۵ ولتی به صورت سری باهم بسته شده اند.

شکل (۱۹) باتریها

سؤال: در یک باتری ۴٫۵ ولتی چند پیل ۱٫۵ ولتی باهم به صورت سری بسته شده اند؟

می دانیم ولتاژ برق تولیدی جهت مصارف خانگی ۲۲۰ ولت متناوب است. این ولتاژ را ولتاژ مؤثر می نامند. ولتاژ مؤثر عبارت است از معادل ولتاژ dc که می توان برای مصارف روشنایی یا گرمایی جایگزین ولتاژ ac کرد. مقدار ماکزیمم یا بیشینهٔ ولتاژ برق برای مصارف خانگی (به شکل ۱۳ مراجعه کنید) حدوداً ۳۱۰ ولت است.

ولت‌متر: در شکل (a-۲۰) یک ولت متر نشان داده شده است. علامت اختصاری فنی ولت متر را در شکل (b-۲۰) و نحوهٔ اتصال آن را به مدار در شکل (c-۲۰) مشاهده می نمایید. هنگام اتصال ولت متر به مدار باید پایانه های آن با قطبهای باتری همسان باشد، در غیراینصورت ولت متر صدمه خواهد دید.

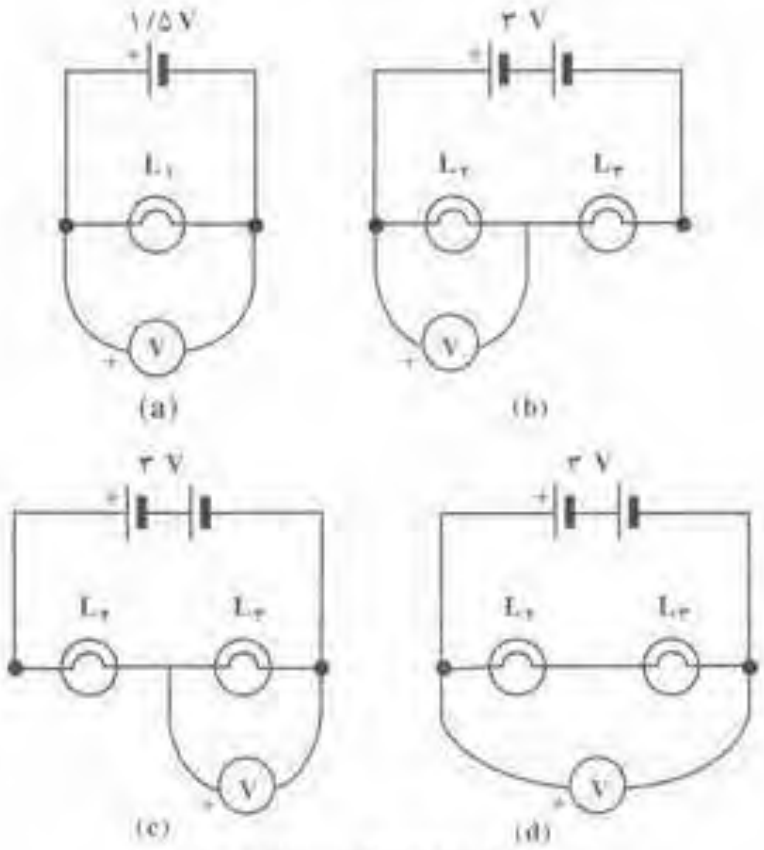


شکل (۲۰) ولت متر و نحوهٔ اتصال آن به مدار

مدارهای سری: در شکل (a-۲۱) ولت متر Ⓥ افت ولتاژ[1] دوسر L_1 را که برابر با ولتاژ منبع تغذیهٔ ۱٫۵ ولتی است اندازه می گیرد. توجه داشته باشید که افت ولتاژ دوسر سیمهای رابط قابل صرفنظر کردن است.

درشکل (b-۲۱) ولت متر Ⓥ افت ولتاژ دوسر L_2 را اندازه می گیرد. اگر لامپهای L_1 و L_2 دقیقاً باهم مشابه باشند ولتاژ ولت متر برابر با نصف ولتاژ منبع تغذیهٔ ۳ولتی یعنی ۱٫۵ ولت خواهد بود.

۱ـ ولتاژ دوسر مصرف کننده را افت ولتاژ می گویند.



شکل (۲۱) اندازه گیری ولتاژ در مدار سری

در شکل (c-۲۱) ولت متر (V) افت ولتاژ دوسر لامپ L_3 را اندازه می گیرد. اگر لامپهای L_2 و L_3 دقیقاً مشابه باشند مقدار ولتاژ اندازه گیری شده برابر با ۱/۵ ولت خواهد بود.

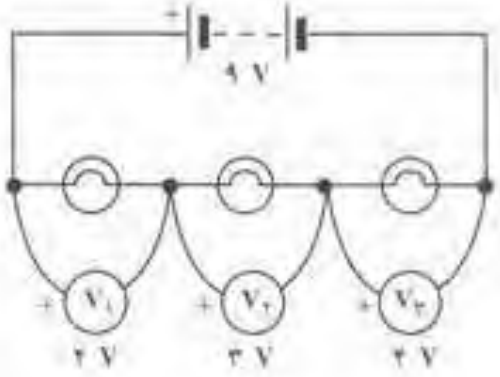
درشکل (d-۲۱) ولت متر (V) افت ولتاژ دوسر L_2 و L_3 را اندازه می گیرد که برابر با ولتاژ منبع تغذیه یعنی ۳ ولت خواهد بود.

باتوجه به اندازه گیریهای انجام شده، درمی یابیم که ولتاژ تغذیه در مدار سری تقسیم می شود. بنابراین در هر مدار سری:

ولتاژ تغذیه برابر است با مجموع افت ولتاژها در مدار.

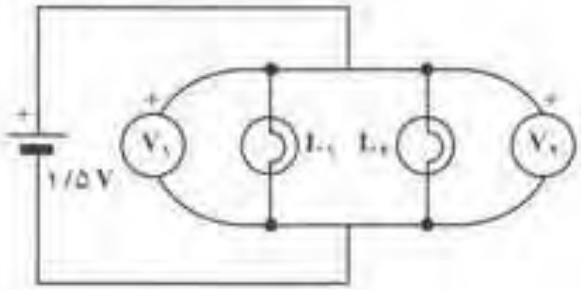
مثال: در شکل (۲۲) ولت متر (V_1) ولتاژی برابر با ۲ ولت و ولت متر (V_2) ولتاژی برابر با ۳ ولت و ولت متر (V_3) ولتاژی برابر با ۴ ولت را نشان می دهد. ولتاژ تغذیه برابر است با:

$V = V_1 + V_2 + V_3 = ۲ + ۳ + ۴ = ۹V$



شکل (۲۲)

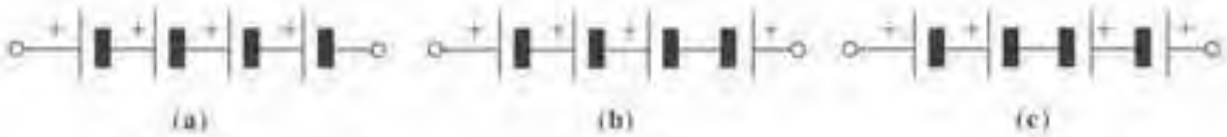
مدارهای موازی (Parallel): در شکل(۲۳) لامپهای L_1 و L_2 به صورت موازی با منبع بسته شده‌اند. در مدار موازی ولتاژ دوسر لامپها، حتی اگر لامپها باهم مشابه نباشند، یکسان است. $V_1 = V_2 = 1/5$



شکل (۲۳)

پرسش

۱ـ در شکل(۲۴) ولتاژ هر یک از پیلها ۱/۵ ولت است، ولتاژ باتری در شکلهای(a ـ b ـ c ـ ۲۴) را بدست آورید.

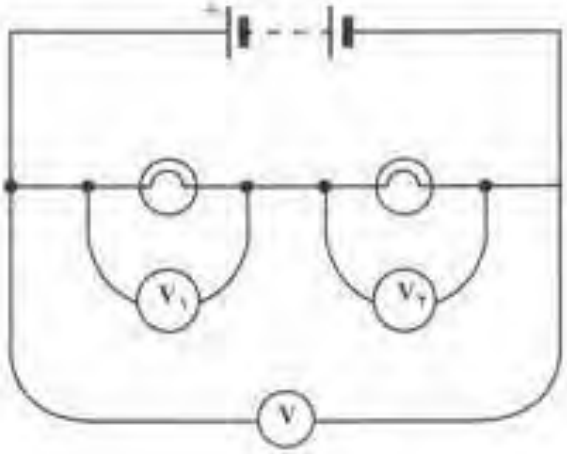


شکل (۲۴)

۲ـ ولت مترهای (V) و (V۱) و (V۲) طبق شکل(۲۵) به مدار متصل شده‌اند:

الف: اگر ولت متر (V) مقدار ۹ ولت و ولت متر (V۱) مقدار ۶ ولت را نشان دهد، (V۲) چه مقداری را نشان خواهد داد؟

ب: در شکل(۲۵) قطبین یا پایانه های ولت متر را مشخص کنید.



شکل (۲۵)

۳ـ باتوجه به شکل (۲۵)، درصورتی که ولتاژهای متفاوتی طبق جدول(۱) به مدار اعمال شود، مقادیر x، y و z را بدست آورید.

V	V_1	V_2
x	۱۲	۶
۶	۴	y
۱۲	z	۴

جدول(۱) مقادیر ولتاژهای اندازه‌گیری شده توسط ولت متر

۵ـ مقاومتهای الکتریکی

می دانیم مواد ازنظر هدایت الکتریکی به سه دسته، **هادیها**، **عایقها** و **نیمه‌هادیها** تقسیم می شوند. هادیها موادی هستند که جریان الکتریکی را براحتی عبور می دهند. عایقها موادی هستند که مانع عبور جریان الکتریکی می شوند و نیمه‌هادیها در حد فاصل عایقها و هادیها قرار دارند. نیمه‌هادیها دارای خواص ویژه‌ای هستند. باتوجه به تقسیم‌بندی بالا مشاهده می شود که هدایت الکتریکی اجسام متفاوت است. بطورکلی مخالفت در مقابل عبور جریان الکتریکی را مقاومت الکتریکی می نامند.

مقاومت الکتریکی یک سیم ضخیم و کوتاه از یک نوع فلز (مثل مس)، کمتر از مقاومت الکتریکی یک سیم نازک و بلند از همان فلز (مس) است.

هرقدر مقاومت الکتریکی کمتر باشد، به شرط ثابت بودن ولتاژ، جریان الکتریکی بیشتری از مدار عبور خواهد کرد، (شکل۲۶). به طورکلی مقاومت الکتریکی[1] بستگی به سه عامل، طول، سطح مقطع و جنس مقاومت دارد و از رابطهٔ زیر محاسبه می شود:

۱ـ مقاومت الکتریکی را با حرف R نشان می دهند که حرف اول کلمهٔ انگلیسی Resistance است.

مقاومت الکتریکی

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

طول سیم

سطح مقطع

مقاومت مخصوص که بستگی به جنس مقاومت دارد.

شکل (۲۶)

واحد مقاومت الکتریکی اهم است و با علامت Ω نشان داده می شود:

در صورتی که دراثر عبور جریان I از یک هادی ولتاژی برابر با V ولت در دوسر آن اُفت کند، مقدار مقاومت الکتریکی از رابطهٔ زیر بدست می آید:

$$R = \frac{V}{I}$$

ولت ← V

آمپر ← I

اهم ← R

رابطهٔ بالا نشان می دهد که در صورت ثابت بودن ولتاژ هرقدر مقاومت الکتریکی بیشتر شود شدت جریان الکتریکی کمتر خواهد شد.

مثال: درصورتی که جریان عبوری از یک مقاومت $I = ۲A$ و ولتاژ اعمال شده به دو سر آن $V = ۶V$ باشد، مقدار R چند اهم است؟

$$R = \frac{V}{I} = \frac{۶}{۲} = ۳\Omega \qquad \boxed{R = ۳\Omega}$$

مثال: درصورتی که $I = ۱A$ ، $V = ۶V$ باشد، مقدار R چند اهم است؟

$$R = \frac{V}{I} = \frac{۶}{۱} = ۶\Omega \qquad \boxed{R = ۶\Omega}$$

با توجه به دو مثال فوق، درمی یابیم که هرقدر مقدار مقاومت کمتر باشد شدت جریان مدار بیشتر است (به شرط ثابت بودن ولتاژ).

محاسبات مدار: گاهی با داشتن مقدار R می خواهیم مقادیر I یا V را بدست آوریم. برای این منظور از دو روش زیر استفاده می کنیم:

۱ـ درصورتی که R و I مشخص باشد، مقدار V از رابطهٔ زیر بدست می آید.

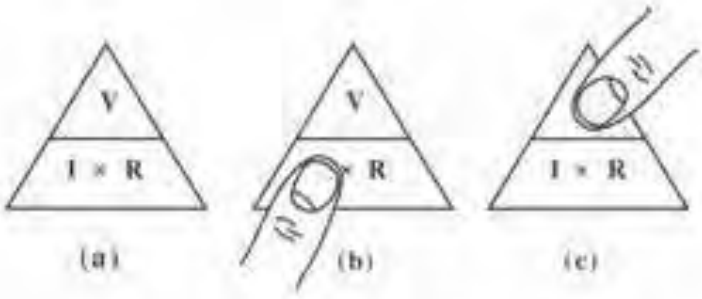
$$V = I \times R$$

۲ـ درصورتی که V و R مشخص باشد مقدار I از رابطهٔ زیر قابل محاسبه است.

$$I = \frac{V}{R}$$

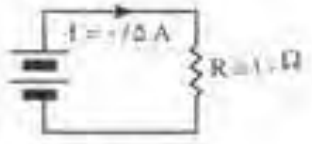
با استفاده از مثلث نشان داده شده درشکل (a ـ ۲۷) می توانیم رابطهٔ فوق را به خاطر بسپاریم. برای پیدا کردن کمیت مجهول کافی است یکی از انگشتان دست را طبق شکلهای (bوc ـ ۲۷) روی کمیت مجهول بگذاریم، عبارت باقیماندهٔ روی مثلث پاسخ کمیت مجهول مورد نظراست.

برای مثال، با پوشاندن I با انگشت دست، رابطهٔ $\frac{V}{R}$ باقی می ماند (شکل b ـ ۲۷).



شکل (۲۷) محاسبهٔ مقادیر V، R و I

مثال: مقدار ولتاژ را در دو سر سیمی به مقاومت Ω ۱۰ بدست آورید. درصورتی که جریان عبوری از آن ۰/۵A باشد.

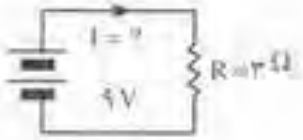


شکل (۲۸ ـ الف)

$R = ۱۰\Omega$ و $I = ۰/۵A$ و $V = ?$

$V = I \cdot R = ۰/۵ \times ۱۰ = ۵V$ $\boxed{V = ۵V}$

مثال: در صورتی که ولتاژ دو سر سیمی به مقاومت ۳ اهم برابر با ۹ ولت باشد، جریان عبوری از آن چند آمپر است؟



شکل (۲۸ـ ب)

$R = ۳\Omega$ ، $V = ۹V$ و $I = ?$

$I = \frac{V}{R} = \frac{۹}{۳} = ۳A$ $\boxed{I = ۳A}$

واحدهای مقاومت: برای مقاومت الکتریکی از واحدهای بزرگتر مانند کیلواهم ($K\Omega$) و مگااهم ($M\Omega$) استفاده می کنند.

$۱K\Omega = ۱۰۰۰\Omega$ $۱M\Omega = ۱۰۰۰۰۰۰\Omega$

درمدارهای الکترونیکی اغلب شرایطی پیش می آید که باید مقدار R برحسب کیلواهم باشد و مقدار جریان برحسب میلی آمپر، در این حالت با استفاده از واحدهای فوق، مقدار ولتاژ برحسب ولت بدست می آید.

الف: اگر $I = ۲mA$ و $R = ۱۰K\Omega$ باشد، مقدار ولتاژ چند ولت است؟

$V = I \times R = ۱۰(K\Omega) \times ۲(mA) = ۲۰V$

$\boxed{V = ۲۰V}$

ب: اگر $I = ۲mA$ ، $V = ۴V$ باشد، مقدار R چند کیلواهم است؟

$R = \frac{V}{I} = \frac{۴(V)}{۲(mA)} = ۲K\Omega$ $\boxed{R = ۲K\Omega}$

ج: اگر $R = ۲K\Omega$ ، $V = ۶V$ باشد، مقدار I چند میلی آمپر است؟

$I = \frac{V}{R} = \frac{۶(V)}{۲(K\Omega)} = ۳mA$ $\boxed{I = ۳mA}$

مقاومتهای ثابت : مقاومتها و هادیها به گونه ای ساخته می شوند که بتوانند جریان عبوری از مدار را در حد مورد نیاز مدار محدود کنند. مقاومتهای ثابت دارای مقادیر ثابتی هستند. این مقاومتها بین چند اهم، تا میلیونها اهم ساخته می شوند. در شکل (۲۹) یک نمونه از این مقاومتها و علامت فنی آن را ملاحظه می کنید. این مقاومتها غالباً به شکل استوانه ای ساخته می شوند و روی آنها حداقل سه نوار رنگی وجود دارد. هر نوار رنگی نمایندهٔ یک عدد است که از روی آن می توانیم مقدار مقاومت را مشخص کنیم.

a ـ مقاومت ثابت

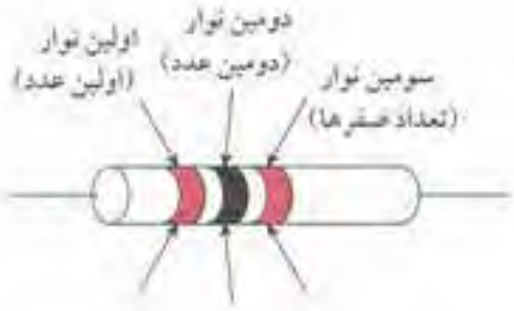
b ـ علامت فنی

شکل (۲۹) مقاومت ثابت

در شکل (a ـ ۳۰) جدول کد رنگی و در شکل (b ـ ۳۰) مفهوم هر نوار رنگی آمده است.

رنگ	شماره
سیاه	۰
قهوه ای	۱
قرمز	۲
نارنجی	۳
زرد	۴
سبز	۵
آبی	۶
بنفش	۷
خاکستری	۸
سفید	۹

(a)



۱۰۰Ω = (۰) قهوه‌ای (۰) سیاه (۱) قهوه‌ای

۴۷۰۰Ω = ۴/۷kΩ = (۰۰) قرمز (۷) بنفش (۴) زرد

۱۵۰۰۰Ω = ۱۵k = (۰۰۰) نارنجی (۵) سبز (۱) قهوه‌ای

۱۰Ω = (۰) سیاه (۰) سیاه (۱) قهوه‌ای

(b)

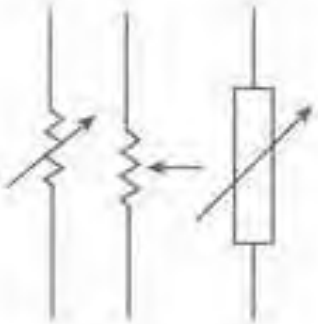
شکل (۳۰) تعیین مقادیر مقاومتها با استفاده از کد رنگی

برای خواندن مقاومت باید از اولین نوار رنگی که به انتهای مقاومت نزدیکتر است شروع کنیم. اولین نوار نماینـدهٔ عدد اول، دومین نوار نمایندهٔ عدد دوم و سومین نوار نماینـدهٔ تعداد صفرهایی است که باید در مقابل دو رقم اول قرار گیرد (ضریب ده)، به مثال شکل(۳۰) توجه کنید.

اغلب مقاومتها دارای یک نوار چهارم، به رنگ طلایی یا نقره ای، نیز هستند که در تعیین مقدار مقاومت دخالت نمی کند بلکه میزان خطا[1] را نشان می دهد.

مقاومت متغیر: مقاومت متغیر مقاومتی است که مقدار آن را می توانیم تغییر دهیـم. درمدارهای الکترونیکی از مقاومت متغیر به عنوان کنترل حجم صدا (ولوم) یا سایر کنتـرلـهـا استفاده می شود شکل(a ـ۳۱). یک نمونه مقاومت متغیر و در شکل(b ـ ۳۱) علامت فنی آن نشان داده شده است. مقاومت متغیر دارای سه پایانه است که به مدار متصل می شود. هنگامی که به عنوان تنظیم کنندهٔ جریان در مدار بکار می رود فقط از پایانـهٔ وسط و یکی از پایانه هـای طرفین استفاده می شود. با تغییر محور مقاومت متغیر، مقدار مقاومت تغییر می کند.

a ـ شکل ظاهری



b ـ علامت اختصاری

شکل (۳۱) مقاومت متغیر

توان ماکزیمم مجاز مقاومتها: وقتی جریان الکتریکی از مقاومت عبور می کند، گرما تولید می شود. هرقدر شدت جریان عبوری از یک مقاومت بیشتر بـاشـد، مـقـدار حـرارت تولیدشده نیز بیشتر است. در صورتی که گرمای تولید شده از حد معینی تجاوز کند، مقاومت آسیب می بیند. بدین سبب برای گرم شدن مقاومت محدودیت در نظر می گـیـرنـد. مـقـدار محدودیت گرما را با مقدار توان مجاز مقاومت بیان می کنند. مقدار توان الکتریکی تلف شده

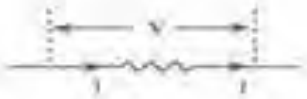
۱ـ درمورد خطای مقاومتها در کتابهای مبانی برق و اندازه گیری الکتریکی بحث شده است.

در مقاومت هرگز نباید از مقدار مجاز آن تجاوز نماید. توان مجاز مقاومتها بستگی به بزرگی ابعاد آن دارد. هرقدر ابعاد مقاومت بزرگتر باشد توان مجاز آن بیشتر است.

مقدار توان P که درمقاومت تلف می شود (توان به صورت گرما تلف می شود) بستگی به مقدار ولتاژ دوسر آن و جریان عبوری از آن دارد و از رابطهٔ زیر محاسبه می شود:

$$P = V.I$$

در رابطهٔ بالا مقدار P برحسب وات و مقدار V برحسب ولت و I برحسب آمپر است (شکل ۳۲).



شکل (۳۲)

مثال: اگر $V = ۲V$ ، $I = ۰/۵A$ باشد مقدار توان تلف‌شده درمقاومت چند وات است؟

$$P = V \times I = ۲ \times ۰/۵ = ۱W \qquad \boxed{P = ۱W}$$

مقدار توان ماکزیمم مجاز مقاومتها را کارخانهٔ سازنده تعیین می کند.

درصورتی که I برحسب میلی آمپر و V برحسب ولت باشد، مقدار توان برحسب میلی وات بدست می آید.

$$۱W = ۱۰۰۰mW$$

در اغلب مدارهای الکترونیکی از مقاومتهای ۰/۲۵ وات تا ۰/۵ وات استفاده می شود.

بستن مقاومتها به صورت سری: به مدار (شکل ۳۳) توجه کنید، در این مدار شرایط زیر حاکم است:

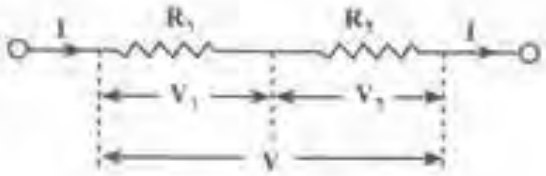
۱ـ مقدار I در مقاومتهای $R_۱$ و $R_۲$ یکسان است.

۲ـ مقدار $V = V_۱ + V_۲$ است.

۳ـ $V_1 = IR_1$ و $V_2 = IR_2$ است.

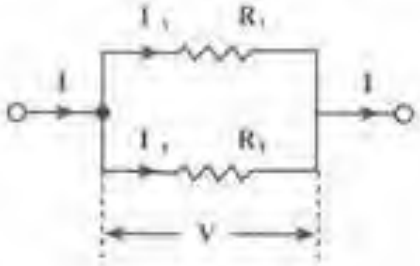
۴ـ مقاومت کل مدار برابر با $R = R_1 + R_2$ است.

درصورتی که $R_1 = 1\Omega$ ، $R_2 = 2\Omega$ باشد، مقدار $R = 1 + 2 = 3\Omega$ می شود.



شکل (۳۳) مقاومتها به صورت سری

بستن مقاومتها به‌صورت موازی: به شکل(۳۴) توجه کنید. دراین شکل شرایط زیر

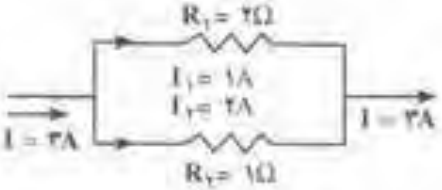


شکل (۳۴)

حاکم است:

۱ـ $I = I_1 + I_2$ ، مقادیر I_1 و I_2 بستگی به مقاومتهای R_1 و R_2 دارد. اگر R_1 دوبرابر R_2 باشد I_1 نصف I_2 خواهد شد.

مثال: اگر $I = 3A$ ، $R_1 = 2\Omega$ ، $R_2 = 1\Omega$ باشد مقدار $I_1 = 1A$ و $I_2 = 2A$ خواهد شد، زیرا همواره باید $I = I_1 + I_2 = 3A$ شود.



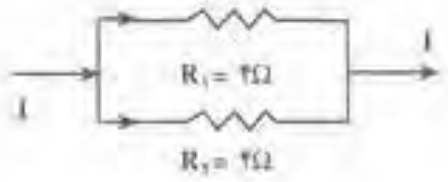
شکل (۳۵)

۲ـ مقدار ولتاژ دوسر مقاومتهای R_1 و R_2 باهم برابر است یعنی:

$$V = I_1R_1 = I_2R_2$$

۳ـ مقاومت معادل مدار از هریک از مقاومتهای R_1 و R_2 کمتر است. مثلاً اگر $R_1 = R_2$

باشد، مقدار $R = \frac{R_1}{2} = \frac{R_2}{2}$ خواهد شد.



شکل (۳۶)

مثال: اگر $R_1 = R_2 = 4\Omega$ باشد، مقدار R برابر است با:

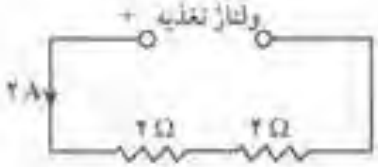
$$R = \frac{R_1}{2} = \frac{R_2}{2} = \frac{4}{2} = 2\Omega \qquad \boxed{R = 2\Omega}$$

مثال کاربردی: باتوجه به شکل (۳۷) مقادیر زیر را به دست آورید:

الف: شدت جریان در مقاومتهای ۲ اهمی و ۴ اهمی.

ب: ولتاژ دو سر مقاومتهای ۲ اهمی و ۴ اهمی.

ج: ولتاژ تغذیهٔ مدار.



شکل (۳۷)

پاسخ الف: باتوجه به شکل (۳۷)، چون مدار سری است جریان عبوری ازمقاومتهای ۲ اهمی و ۴ اهمی باهم برابر است و همان ۲ آمپر می‌باشد.

پاسخ ب:

$$V_{R_1} = IR_1 = 2 \times 2 = 4V$$

$$V_{R_2} = IR_2 = 2 \times 4 = 8V$$

پاسخ ج:

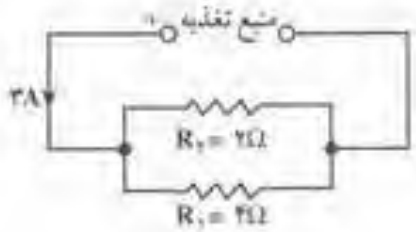
$$V = V_1 + V_2 = 4 + 8 = 12V$$

مثال کاربردی: باتوجه به شکل (۳۸) مقادیر زیر را بدست آورید:

الف: مقدار جریان عبوری از مقاومتهای ۲ اهمی و ۴اهمی.

ب: ولتاژ دوسر هریک از مقاومتهای ۴اهمی و ۲ اهمی.

ج: ولتاژ تغذیه.



شکل (۳۸)

پاسخ الف: چون نسبت مقاومتها یک به دو است (مقاومت ۴ اهمی دو برابر ۲ اهمی است)، لذا جریان به نسبت $\frac{۱}{۳}$ و $\frac{۲}{۳}$ تقسیم می شود.

بنابراین جریان عبوری از مقاومت ۴ اهمی $۳\times\frac{۱}{۳}=۱A$ و جریان عبوری ازمقاومت ۲اهمی $۳\times\frac{۲}{۳}=۲A$ است[۱].

پاسخ ب: ولتاژ دوسر هریک از مقاومتها از حاصلضرب جریان در مقاومت بدست می آید:

$$V_{\text{دوسر }۱}=I_۱R_۱=۲\times۲=۴V$$
$$V_{\text{دوسر }۲}=I_۲R_۲=۱\times۴=۴V$$

پاسخ ج: درمدار موازی ولتاژ تغذیه برابر است با ولتاژ دوسر هریک از مقاومتها

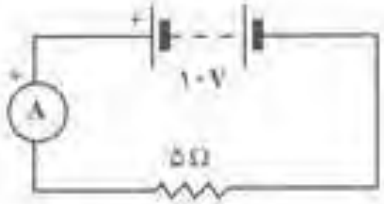
$$V_۱=V_۲=V=۴V$$

پرسش

۱ـ باتوجه به شکل(۳۹) به سؤالات زیر پاسخ دهید:

الف: آمپرمتر (A) چه مقداری را نشان می دهد؟

ب: مقدار افت ولتاژ در دوسر مقاومت ۵ اهمی چند ولت است؟ (از مقاومت آمپرمتر صرفنظر می شود.)



شکل (۳۹)

۱ـ به بیان دیگر $I_{R_۱}=\frac{۳\times۲}{۲+۲}=۱A$ و $I_{R_۲}=\frac{۳\times۲}{۲+۲}=۲A$ است.

ج: مدار را مجدداً ترسیم کنید و در دوسر مقاومت ۵ اهمی یک ولت‌متر قرار دهید و قطبهای آن را مشخص کنید.

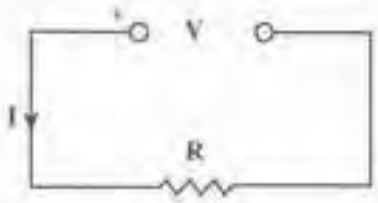
۲ـ درصورتی که ولتاژ دوسر لامپی برابر با ۱۲ ولت و جریان عبوری از آن ۴ آمپر باشد، مقاومت لامپ چقدر است؟

۳ـ درصورتی که جریان عبوری از یک مقاومت ۱۰ اهمی برابر با ۲ آمپر باشد، ولتاژ دوسر آن چند ولت خواهد بود؟

۴ـ باتوجه به شکل (۴۰) مقادیر زیر را بدست آورید:

الف: اگر $I = 5mA$ ، $R = 2K\Omega$ باشد، مقدار V چند ولت است؟

ب: اگر $V = 12V$ ، $I = 3mA$ باشد، مقدار R چند کیلواهم است؟

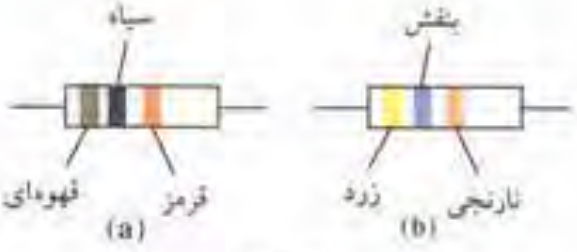


شکل (۴۰)

ج: اگر $V = 10V$ ، $R = 5K\Omega$ باشد، مقدار I برابر با چند میلی‌آمپر است؟

د: مقدار توان تلف شده در مقاومت را در هریک از مراحل الف، ب و ج محاسبه کنید.

۵ـ مقدار مقاومتهای نشان داده شده درشکلهای (a و b ـ۴۱) را با کد رنگی مقاومتها تعیین کنید.



شکل (۴۱)

۶ـ نوارهای رنگی مقاومتهای زیر را مشخص کنید.

الف ـ 10Ω ب ـ 150Ω ج ـ $3/9K\Omega$ د ـ $10K\Omega$

هـ ـ $330K\Omega$ و ـ $1M\Omega$

۷ـ درمدار شکل(۴۲) مقادیر زیر را بدست آورید:

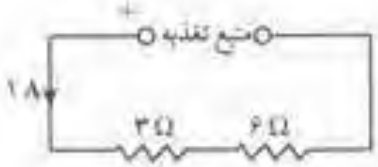
الف: جریان عبوری ازمقاومت ۳ اهمی.

ب: جریان عبوری از مقاومت ۶ اهمی.

ج: ولتاژ در دوسر مقاومت ۳ اهمی.

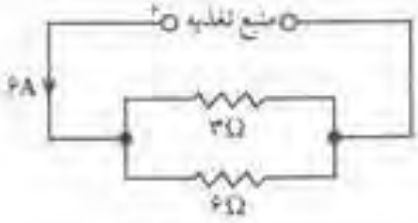
د: ولتاژ در دوسر مقاومت ۶ اهمی.

هـ: ولتاژ منبع تغذیه.



شکل (۴۲)

۸ـ باتوجه به شکل(۴۳) به سؤالات مربوط به مسئله شمارهٔ ۷ پاسخ دهید.



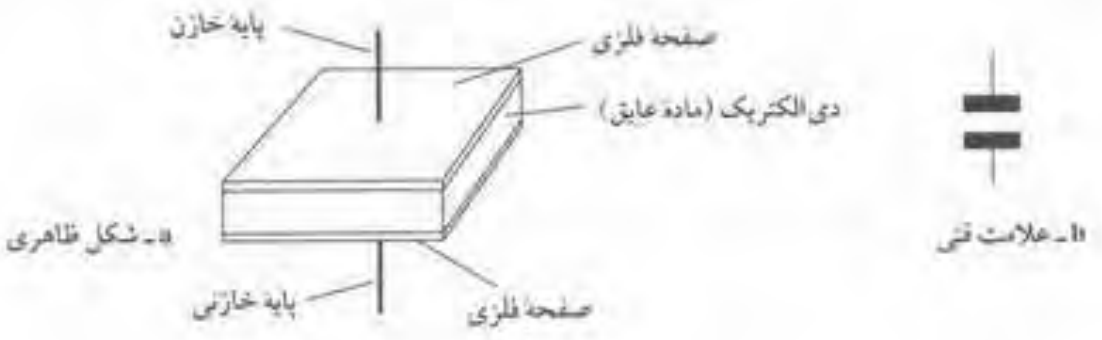
شکل (۴۳)

۹ـ مداری رسم کنید که با استفاده از دو مقاومت ۱۰ اهمی، یک مقاومت ۵ اهمی بدست آید.

۶ـ خازنها (Capacitor)

خازن چیست؟ خازن قطعه ای الکترونیکی است که می تواند بار الکتریکی را به صورت الکترون درخود ذخیره کند.

ساختمان خازن: باتوجه به شکل(a ـ ۴۴) درمی یابیم که خازن از دو صفحهٔ فلزی موازی تشکیل شده است. بین دو صفحهٔ فلزی لایه ای از جنس عایق قرار دارد. لایهٔ عایق را دی الکتریک می نامند. علامت فنی خازن در شکل(b ـ ۴۴) آمده است.



شکل (۴۴)

ظرفیت خازن (Capacitance): توانایی خازن را در ذخیرهٔ بار الکتریکی، ظرفیت خازن می گویند. بنابراین هرقدر ظرفیت خازن بیشتر باشد، می تواند بار الکتریکی بیشتری ذخیره کند. هرقدر سطح مشترک صفحات خازن بیشتر و ضخامت دی الکتریک آن نازکتر باشد، ظرفیت خازن بیشتر است. ظرفیت خازن به جنس عایق نیز بستگی دارد.

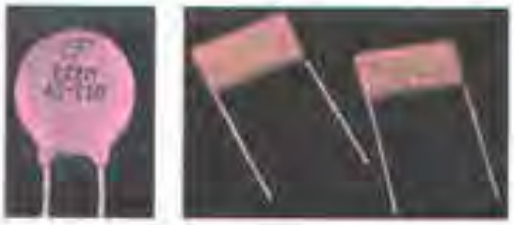
واحد ظرفیت خازن فاراد است، فاراد را با F نشان می دهند. به علت بزرگی فاراد از واحدهای کوچکتر یعنی، میکروفاراد (μF)، نانو فاراد (NF) و پیکو فاراد (PF) استفاده می شود.

$$1F = 1000000\mu F \qquad 1\mu F = 1000NF \qquad 1NF = 1000PF$$

ولتاژ کار خازن Working Voltage (WV): حداکثر مقدار ولتاژ dc یا ماکزیمم ولتاژ ac را که خازن می تواند تحمل کند، به طوری که دی الکتریک آن آسیب نبیند را ولتاژ کار خازن یا WV می نامند. مقدار ولتاژ کار خازن را معمولاً روی آن می نویسند یا مقدار آن توسط کارخانهٔ سازنده اعلام می شود.

انواع خازن

خازنهای ثابت: خازنهای ثابت معمولاً دارای ظرفیت ثابتی هستند و براساس جنس دی الکتریک نامگذاری می شوند. از انواع خازنهای ثابت می توان خازنهای پلی استر، سرامیک و میکا را نام برد (شکل ۴۵).

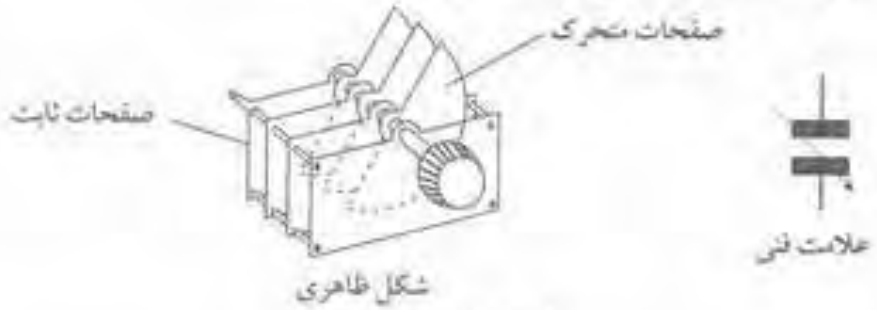


شکل (۴۵)

خازنهای الکترولیتی: خازنهای الکترولیتی همان خازنهای ثابت هستند که معمولاً با ظرفیت بالا ساخته می شوند. خازنهای الکترولیتی قطبی شده اند، یعنی هنگام اتصال آنها به مدار باید قطب مثبت و منفی آن را درنظر داشت شکل(۴۶) تصویر ظاهری خازن الکترولیتی و علامت فنی آن را نشان می دهد.

شکل (۴۶)

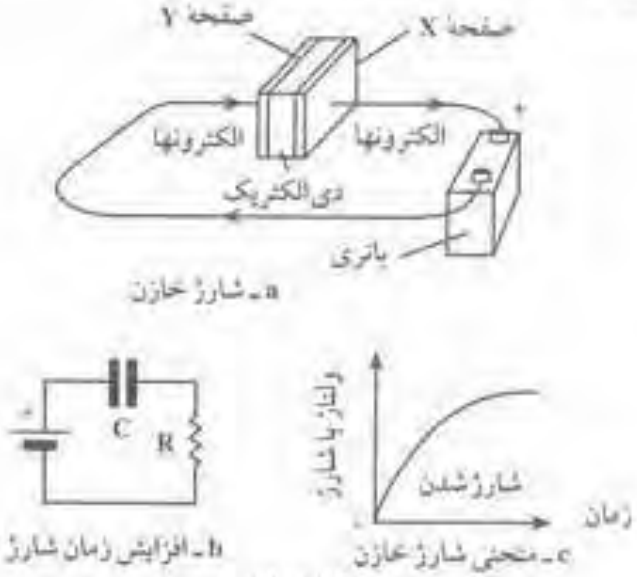
خازنهای متغیر: خازنهای متغیر دارای دو مجموعه صفحات ثابت و متحرک هستند که به موازات یکدیگر نصب شده‌اند و بین آنها مادهٔ دی الکتریک قرار دارد (شکل ۴۷). با حرکت دادن صفحات متحرک ظرفیت خازن تغییر می‌کند. از این نوع خازن در تنظیم موج رادیو برای گرفتن ایستگاههای مختلف رادیویی استفاده می‌شود.



شکل (۴۷)

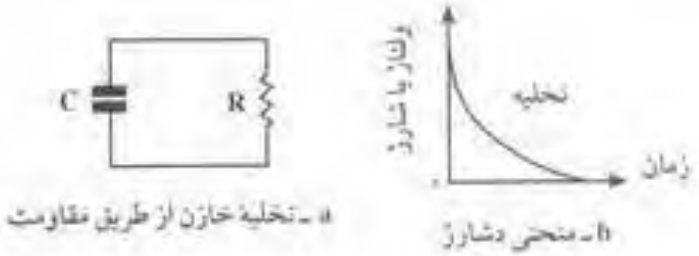
شارژ خازن: اگر مداری را طبقه شکل(a ـ ۴۸) ببندیم، تعدادی از الکترونهای قطب منفی باتری جذب صفحهٔ Y و همزمان تعدادی از الکترونهای صفحهٔ X جذب قطب مثبت باتری می‌شوند. بدین ترتیب صفحهٔ Y دارای بار الکتریکی منفی و صفحهٔ X دارای بار الکتریکی مثبت خواهد شد. این عمل را شارژ شدن خازن می‌نامند. در شروع شارژ جریانی در مدار به وجود می‌آید که پس از شارژ شدن خازن متوقف می‌شود. یک خازن پس از شارژ شدن می‌تواند مانند باتری عمل کند، زیرا مقداری از انرژی باتری را در خود ذخیره کرده است. ولتاژ دو سر خازن پس از شارژ کامل دقیقاً برابر با ولتاژ باتری خواهد بود.

شارژ خازن معمولاً خیلی سریع اتفاق می‌افتد. درصورتی که طبق شکل(b ـ ۴۸) مقاومتی را به صورت سری با خازن ببندیم، زمان شارژ شدن خازن زیاد می‌شود. منحنی زمان شارژ خازن در شکل(c ـ ۴۸) نشان داده شده است.



شکل (۴۸)

تخلیه خازن (دشارژ): خازن می تواند انرژی ذخیره شده را تا مدت زیادی پس از شارژ در خود نگهدارد. در این حالت تخلیهٔ خازن از طریق نفوذ در دی الکتریک انجام می شود که بسیار کند است، درصورتی که یک هادی در دوسر خازن قرار دهیم، خازن سریعاً دشارژ می شود. چنانچه مقاومتی را بین دو پایهٔ خازن طبق (شکل a ـ ۴۹) قرار دهیم سرعت تخلیهٔ خازن کند خواهد شد (شکل b ـ ۴۹). منحنی تخلیه یا دشارژ خازن را برحسب زمان نشان می دهد.

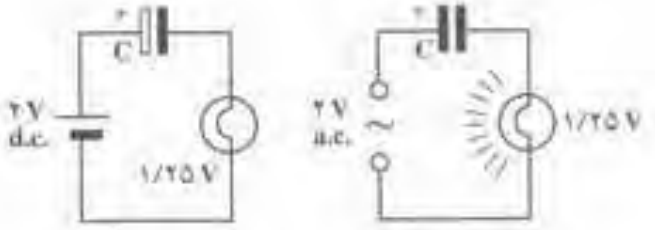


a ـ تخلیهٔ خازن از طریق مقاومت

b ـ منحنی دشارژ

شکل (۴۹) تخلیه خازن

خازن مسیری برای عبور جریان ac و سدی برای dc: در شکل (a ـ ۵۰) منبع تغذیه dc است. در لحظهٔ شارژ خازن جریانی لحظه ای از مدار عبور می کند که سبب شارژ خازن می شود و سپس متوقف می گردد. بنابراین در این حالت لامپ روشن نمی شود؛ پس خازن جریان مستقیم یا dc را از خود عبور نمی دهد.



a ـ خازن مانع عبور جریان dc می شود

b ـ خازن جریان ac را عبور می دهد.

شکل (۵۰) خازن در جریان dc و ac

در شکل (b ـ ۵۰)، منبع تغذیه ac است. در این مدار لامپ روشن می شود، زیرا به علت عوض شدن جهت جریان ac خازن در هر لحظه شارژ و دشارژ می شود و درنتیجه لامپ را روشن نگاه می دارد.

پرسش

۱ـ روی خازنی 0·۱μF۲۵WV نوشته شده است، مفهوم آن چیست؟

۲ـ چرا نمی توان خازنی با ولتاژکار ۲۵۰ ولت را در ولتاژ متناوب ۲۴۰ ولت بکار برد؟

۳ـ خازنهای زیر را به ترتیب مقادیر آنها مرتب کنید:

۱۰۰PF_ ۴/۷μF_ ۲/۲NF

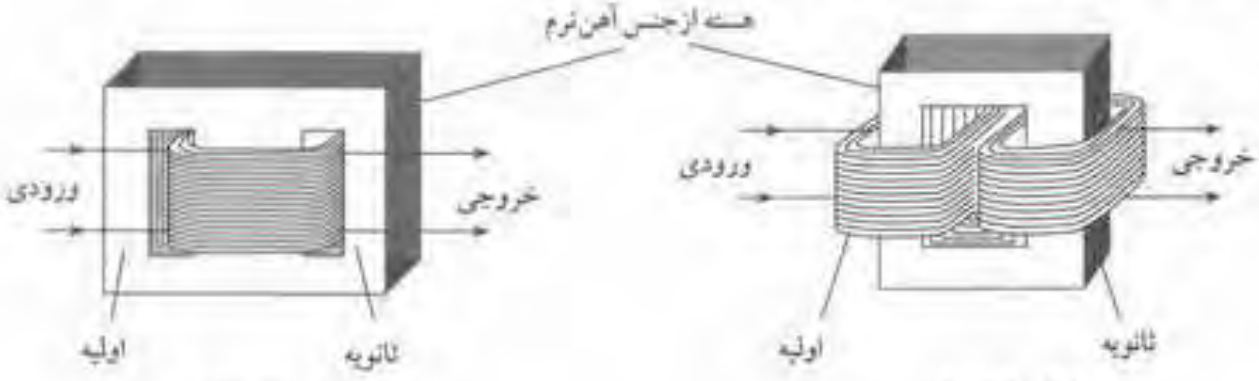
۴ـ در صورتی که بخواهیم از مداری جریان ac عبورکند ولی جریان dc عبور نکند چه قطعه ای را باید بکار بریم؟

۵ـ سه ویژگی مهم خازن را نام ببرید.

۷ـ ترانسفورماتورها (Transformers)

ترانسفورماتور چیست؟ ترانسفورماتور وسیله ای است که می تواند ولتاژ یا جریان متناوب را افزایش یا کاهش دهد. یک ترانسفورماتور افزاینده[1]، ولتاژ را افزایش و برعکس جریان را کاهش می دهد. ترانسفورماتور کاهنده[2] ولتاژ را کاهش و جریان را افزایش می دهد.

یک ترانسفورماتور حداقل از دو سیم پیچ و یک هستهٔ آهنی تشکیل می‌شود. سیم پیچها را به ترتیب سیم پیچ اولیه[3] و سیم پیچ ثانویه[4] می نامند. ارتباط سیم پیچهای اولیه و ثانویه با یکدیگر الکتریکی نیست بلکه مغناطیسی است. سیمها روی هسته‌ای از جنس آهن نرم (شکل a و b ـ ۵۱) به صورت کلاف پیچیده شده اند. سیمها ممکن است طبق شکل (a ـ ۵۱) روی هم یا طبق شکل (b ـ ۵۱) جدا ازهم پیچیده شوند. در شکل (c ـ ۵۱)، شکل ظاهری سه نمونه ترانسفورماتور را مشاهده می کنید.



شکل (a ـ ۵۱)　　شکل (b ـ ۵۱)

۱- Step up Transformer　　۲- Step down Trinsformer

۳- Primary　　۴- Secondary

شکل (۵ـ۵۱)

ولتاژ متناوب به سیم پیچ اولیه، که ورودی ترانسفورماتور است، داده می شود و ولتاژ خروجی از دو سر ثانویه (خروجی ترانسفورماتور) دریافت می گردد. اگر ترانسفورماتور افزاینده باشد ولتاژ ثانویه بیشتر از اولیه و اگر ترانسفورماتور کاهنده باشد ولتاژ ثانویه کمتر از اولیه است. توجه داشته باشید که ازنظر تئوری همواره توان اولیهٔ ترانسفورماتور با توان ثانویهٔ آن تقریباً برابر است، یعنی:

$$P_p = V_p \times I_p \text{ و } P_s = V_s \times I_s \Rightarrow P_p \simeq P_s$$

↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
توان	ولتاژ	جریان	توان	ولتاژ	جریان	توان	توان
اولیه	اولیه	اولیه	ثانویه	ثانویه	ثانویه	اولیه	ثانویه

یادآوری می شود که به علت تلفات ایجاد شده در مدار اولیه و ثانویه، عملاً توان خروجی ترانسفورماتور کمی کمتر از توان ورودی آن است که در محاسبات معمولی آنها را برابر درنظر می گیرند (از تلفات صرفنظر می کنند).

$$P_p = P_s$$

علامت فنی ترانسفورماتور افزاینده در شکل (a ـ ۵۲) و ترانسفورماتور کاهنده درشکل (b ـ ۵۲) ترسیم شده است.

شکل (۵۲)

نسبت تعداد دور : نسبت ولتاژ اولیه به ولتاژ ثانویه تقریباً برابر است با نسبت تعداد دور سیم پیچ اولیه به تعداد دور سیم پیچ ثانویه .

$$\frac{\text{ولتاژ اولیه}}{\text{ولتاژ ثانویه}} = \frac{\text{تعداد دور اولیه}}{\text{تعداد دور ثانویه}}$$

یا :

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p \leftarrow \text{تعداد دور اولیه}}{N_s \leftarrow \text{تعداد دور ثانویه}} = K$$

نسبت فوق را نسبت دور یا نسبت تبدیل ترانسفورماتور می گویند .

مثال : اگر در یک ترانسفورماتور افزاینده تعداد دور سیم پیچ اولیه $N_p = ۱۰۰۰$ دور و تعداد دورسیم پیچ ثانویه $N_s = ۲۰۰۰$ دور و ولتاژ اولیه ۱۲ ولت باشد، تعیین کنید :

۱ـ نسبت تبدیل ۲ـ ولتاژ ثانویه

$$\text{نسبت تبدیل} = K = \frac{N_p}{N_s} = \frac{۱۰۰۰}{۲۰۰۰} = \frac{۱}{۲}$$

$$K = \frac{V_p}{V_s} \Rightarrow \frac{۱}{۲} = \frac{۱۲}{V_s} \text{ و } \boxed{V_s = ۲۴V}$$

در این مثال، باتوجه به نسبت تبدیل، به راحتی می توانیم حدس بزنیم که ولتاژ ثانویه دوبرابر ولتاژ اولیه و جریان ثانویه نصف جریان اولیه است . چرا؟

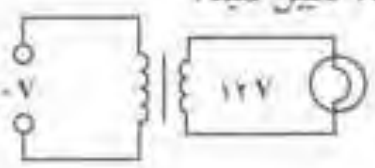
مثال : در یک ترانسفورماتور کاهنده اگر $N_p = ۱۰۰۰$ و $N_s = ۵۰۰$ و ولتاژ ثانویه برابر با ۳ ولت باشد تعیین کنید نسبت تبدیل و ولتاژ اولیه را .

$$K = \frac{N_p}{N_s} = \frac{۱۰۰۰}{۵۰۰} = ۲$$

$$K = \frac{V_p}{V_s} \Rightarrow ۲ = \frac{V_p}{۳} \text{ و } \boxed{V_p = ۶V}$$

باتوجه به نسبت تبدیل، به آسانی می توان دریافت که ولتاژ ثانویه نصف ولتاژ اولیه و جریان ثانویه دوبرابر جریان اولیه است . چرا؟

مثال : یک ترانسفورماتور کاهنده طبق شکل(۵۳) برای روشن کردن یک لامپ ۱۲ ولتی، ولتاژ برق شهر را از ۲۴۰ ولت به ۱۲ ولت کاهش می دهد . تعیین کنید :



شکل (۵۳)

۱ـ نسبت تبدیل ترانس.

۲ـ درصورتی که تعداد دور ثانویه ۱۰۰ دور باشد، تعداد دور اولیه چند دور است؟

۳ـ درصورتی که جریان عبوری از ثانویه ۲ آمپر باشد جریان اولیه چقدر خواهد بود؟

۱) $V_p = ۲۴۰V \quad V_s = ۱۲V$

ترانس ۲۰ به یک کاهنده $K = \frac{V_p}{V_s} = \frac{۲۴۰}{۱۲} = \frac{۲۰}{۱}$

۲) تعداد دور ثانویه $K = \frac{N_p}{N_s}$ و $۲۰ = \frac{N_p}{۱۰۰}$ و $N_p = ۲۰۰۰$

۳) ولتاژ در ثانویه به اندازهٔ ۲۰ برابر کاهش یافته است پس شدت جریان در آن به اندازهٔ ۲۰ برابر افزایش یافته است، بنابراین شدت جریان در اولیه به اندازهٔ ۲۰ برابر کم‌تر از جریان ثانویه است.

$$\text{جریان اولیه} = I_p = I_s \times \frac{۱}{۲۰} = ۲ \times \frac{۱}{۲۰} = ۰/۱A$$

$$\boxed{I_p = ۰/۱A}$$

پرسش

۱ـ نسبت دور ترانسفورماتورهای زیر را بدست آورید.

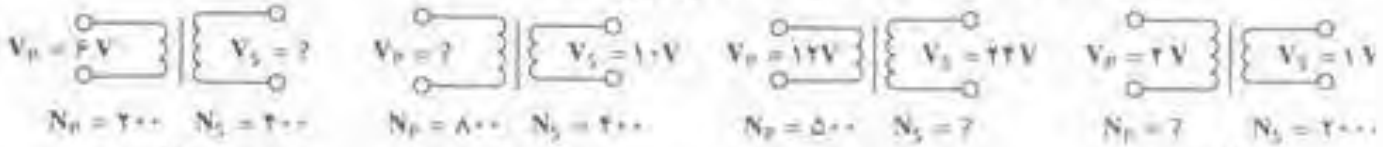
الف: $N_p = ۲۰۰$ و $N_s = ۴۰۰$

ب: $N_p = ۶۰۰$ و $N_s = ۳۰۰$

ج: $V_p = ۱$ و $V_s = ۴$

د: $V_p = ۱۰V$ و $V_s = ۲V$

۲ـ باتوجه به شکل (۵۴) به سؤالات زیر پاسخ دهید:



شکل (۵۴)

a: در شکل (a ـ ۵۴) مقدار ولتاژ ثانویه (V_s) چقدر است؟

b: در شکل (b ـ ۵۴) مقدار ولتاژ اولیه (V_p) چقدر است؟

c: در شکل (c ـ ۵۴) تعداد دور ثانویه (N_s) چقدر است؟

d: در شکل (d ـ ۵۴) تعداد دور اولیه (N_p) چقدر است؟

۳ـ در یک ترانسفورماتور اگر ولتاژ اولیه ۲۴۰ ولت ac و ولتاژ ثانویه ۴۸۰ ولت ac و جریان اولیه ۲۰۰ میلی آمپر باشد، جریان در سیم پیچ ثانویه چقدر است؟

۸ـ مبدلها (Transducer ـ ترانس دیوسر)

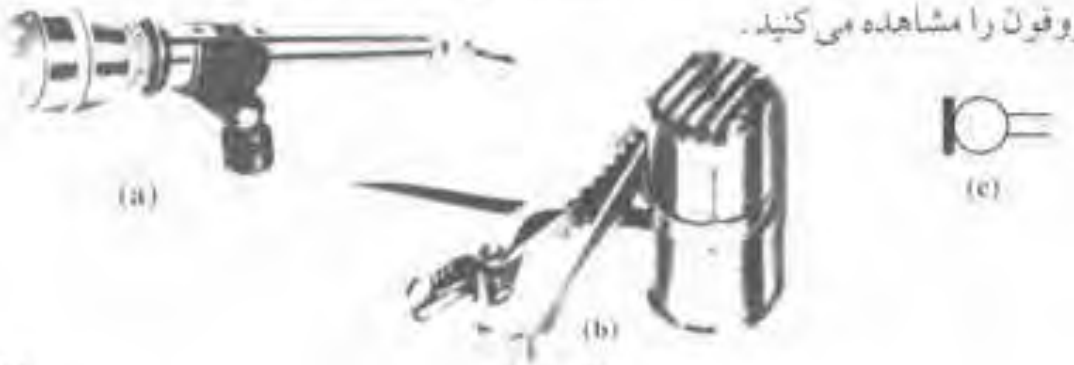
مبدل وسیله ای است که می تواند یک نوع انرژی را به نوع دیگر تبدیل کند. در سیستمهای الکترونیکی، انرژی ورودی سیستم توسط یک مبدل به انرژی الکتریکی تبدیل می شود و سیستم را تغذیه می کند. در خروجی سیستم، مبدل انرژی الکتریکی را تبدیل به انرژی مورد استفاده می کند. با استفاده از مبدلها، امکان ارتباط بین قسمتهای مختلف یک سیستم بوجود می آید. (شکل ۵۵) مثالی از عملکرد مبدلها را مشاهده می کنید.

شکل (۵۵)

مبدلهای ورودی:

الف ـ میکروفون: میکروفون وسیله ای است که انرژی مکانیکی صوت را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند، به این صورت که ارتعاشات مکانیکی به یک صفحهٔ قابل ارتعاش، که دیافراگم نامیده می شود، برخورد می کند و آن را به جلو و عقب می راند. در اثر این حرکت است که انرژی الکتریکی تولید می شود.

میکروفون انواع مختلف دارد که متداول ترین آن میکروفون یا سیم پیچ متحرک یا میکروفون دینامیکی است (شکل a ـ ۵۶). نوع دیگر میکروفون که کاربرد وسیعی در سیستمهای صوتی با کیفیت بالا دارد میکروفون خازنی است (شکل b ـ ۵۶). در شکل (c ـ ۵۶) علامت فنی میکروفون را مشاهده می کنید.



شکل (۵۶)

ب ـ ترمیستور (Thermistor): ترمیستور، یا مقاومت حرارتی، مقاومتی است که مقدار آن در اثر تغییرات گرما تغییر می کند. ترمیستور بر دو نوع است:

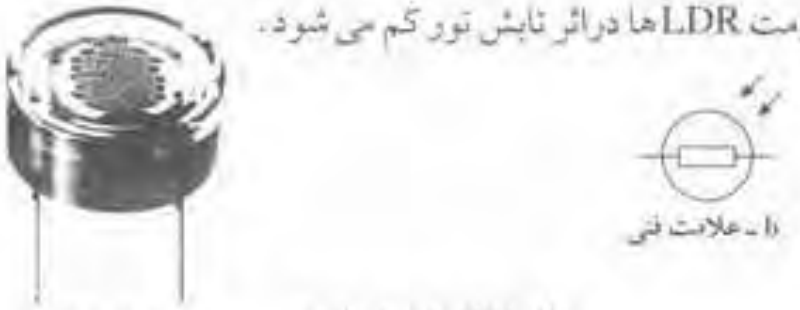
۱ ـ *مقاومت با ضریب حرارتی منفی NTC*[1]: درصورتی که در اثر بالا رفتن دما، مقدار مقاومت الکتریکی کاهش یابد، این مقاومت را NTC می نامند.

۲ ـ *مقاومت با ضریب حرارتی مثبت* PTC[2]: درصورتی که در اثر بالا رفتن دما، مقدار مقاومت الکتریکی افزایش یابد مقاومت را PTC می نامند.

با استفاده از این خاصیت، یعنی تغییر مقاومت در اثر دما، ترمیستور ساخته می شود که از آن، جهت تبدیل دما به انرژی الکتریکی استفاده می شود. در شکل (۵۷) نمونه ای از یک ترمیستور و علامت فنی آن را مشاهده می کنید.

شکل (۵۷) ترمیستور و علامت فنی آن

ج ـ مقاومت تابع نور یا LDR[3]: مقاومتهای تابع نور مقاومتهایی هستند که مقدار آنها در اثر تابش نور تغییر می کند. از این مقاومتها جهت تبدیل انرژی نورانی به انرژی الکتریکی استفاده می شود. در شکلهای a و b ـ ۵۸ یک نمونه LDR و علامت فنی آن را مشاهده می کنید. معمولاً مقدار مقاومت LDR ها در اثر تابش نور کم می شود.



شکل (۵۸) مقاومت تابع نور

۱ـ NTC Negative Temperature Coefficient

۲ـ PTC Positive Temperature Coefficient

۳ـ LDR Light Dependent Resistor

د- **کلیدها**: می دانیم هنگامی که کلید یک دستگاه را می زنیم، انرژی الکتریکی وارد دستگاه می شود و آن را بکار می اندازد. بنابراین کلید یک وسیلهٔ مکانیکی جهت کنترل مدار است. بدین سبب کلیدها را بعنوان مبدلهای ورودی سیستم نیز می شناسند. در شکل (۵۹) چند نمونه کلید وعلامت فنی آن را مشاهده می کنید.

شکل (۵۹) چند نمونه کلید به عنوان مبدل ورودی

مبدلهای خروجی: مبدلهای خروجی مبدلهایی هستند که انرژی موجود در خروجی سیستم را تبدیل به نوع دیگری از انرژی قابل استفاده می کنند. از انواع مبدلهای خروجی می توان بلندگوها، بوبینها، موتورهای الکتریکی، لامپها و ... را نام برد. در زیر به شرح تعدادی از آنها می پردازیم:

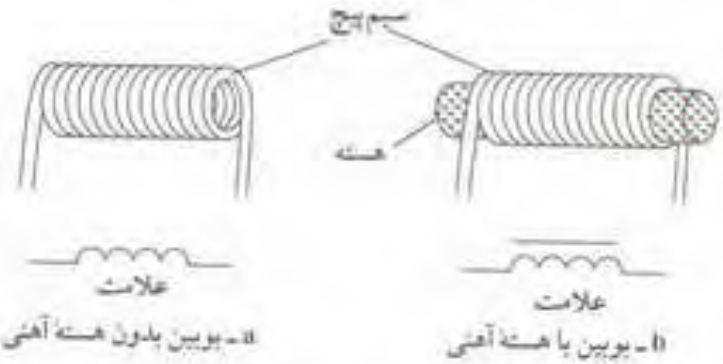
الف- **بلندگو (Loud speaker)**: بلندگو انرژی الکتریکی حاصل از صوت را تبدیل به انرژی مکانیکی صوتی، که قابل شنیدن است، می کند. بلندگو با سیم پیچ متحرک مشابه میکروفون با سیم پیچ متحرک است و آن را بلندگوی دینامیکی می نامند. در شکل (۶۰) دو نمونه بلندگو و علامت فنی آن آمده است.

ب- **بوبین یا سولونوید (Solenoid)**: بوبین یا سولونوید از تعدادی حلقهٔ سیم پیچ تشکیل شده است که در اثر عبور جریان الکتریکی از آن، در اطرافش خاصیت مغناطیسی ایجاد می شود. هرقدر تعداد دورهای سیم پیچ و جریان عبوری از آن بیشتر باشد، شدت میدان مغناطیسی نیز بیشتر خواهد شد. درصورتی که یک هسته از آهن نرم نیز در داخل بوبین قرار گیرد، شدت میدان مغناطیسی بیشتر می گردد. حال اگر یک جسم آهنی را به هسته نزدیک کنیم، جسم آهنی جذب هسته می شود و این به معنی آن است که با استفاده از بوبین می توان انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل کرد.

شکل (۶۰) بلندگو به عنوان مبدل خروجی

علامت فنی بلندگو

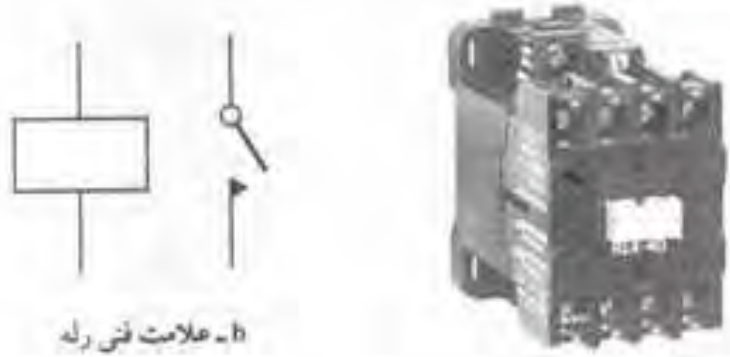
در شکل (a ـ ۶۱) بوبین بدون هستهٔ آهنی و در شکل (b ـ ۶۱) بوبین با هستهٔ آهنی و علامت فنی آن را ملاحظه می کنید.



شکل (۶۱)

ج ـ رله (Relay) : رله یا کنتاکتور، یک کلید الکتریکی است. در هر رله یک بوبین وجود دارد که در اثر عبور جریان الکتریکی از آن مغناطیس می شود. با مغناطیس شدن بوبین، صفحه ای فلزی، که تعدادی کنتاکت (اتصال) روی آن نصب شده، حرکت می کند که موجب بسته شدن یا بازشدن تعدادی از کنتاکتها می شود. معمولاً کنتاکتهای رله جریان زیادی را از خود عبور می دهند. بدین سبب با استفاده از رله می توان با جریان بسیار کم، جریانهای زیاد را

تحت کنترل قرار داد. از رله برای زنگ اخبار نیز استفاده می شود. در شکل(۶۲) یک نمونه رله و علامت فنی آن نشان داده شده است.



a ـ شکل ظاهری

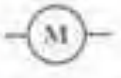
b ـ علامت فنی رله

شکل (۶۲) رله و علامت فنی آن

د ـ **موتور الکتریکی**: موتور الکتریکی مبدلی است که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی دورانی تبدیل می کند. در بسیاری از وسایل الکتریکی خانگی از قبیل یخچال، پنکه، ماشین لباسشویی و نیز ربطهای صنعتی و خط مونتاژ کارخانه ها از موتور الکتریکی استفاده می شود، درشکل(۶۳) نمونه ای از یک موتور الکتریکی و علامت فنی آن رسم شده است.

هـ ـ **لامپها**: لامپها انرژی الکتریکی را به انرژی نورانی تبدیل می کنند. در لامپهای معمولی فقط ۲درصد از انرژی الکتریکی تبدیل به انرژی نورانی می شود و ۹۸ درصد بقیه، ناخواسته،

a ـ شکل ظاهری موتور



b ـ علامت فنی موتور

شکل (۶۳) موتور الکتریکی به عنوان مبدل الکتریکی به مکانیکی

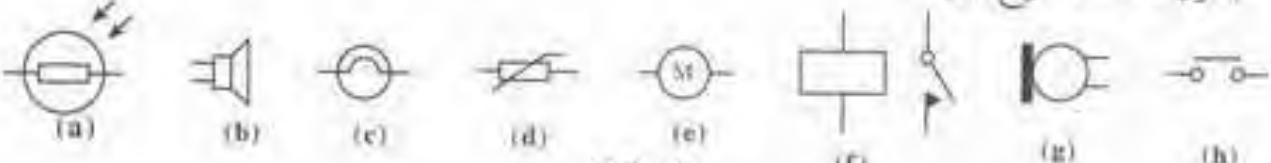
تبدیل به انرژی گرمایی می شود. در لامپهای فلورسنت تبدیل انرژی الکتریکی به نورانی حدوداً

۱۰ تا ۱۲ درصد است. لامپهای LED[1] که بنام دیودهای منتشر کنندهٔ نور نیز نامیده می شوند، انرژی الکتریکی را مستقیماً به انرژی نورانی تبدیل می کنند و از بازدهٔ بالایی برخوردارند.

و ـ گرم کننده ها (Heaters): گرم کننده ها همه، مبدل انرژی الکتریکی به گرمایی هستند. به این طریق که انرژی در اثر عبور جریان از یک مقاومت الکتریکی انرژی گرمایی ایجاد می شود. از انواع این مبدلها می توان بخاری برقی، اطوی برقی، سماور برقی و ... را نام برد.

پرسش

۱ـ در شکل (۶۴)، هر مبدل را با توجه به علامت فنی آن نام ببرید و عملکرد هریک را بطور خلاصه شرح دهید.



شکل (۶۴)

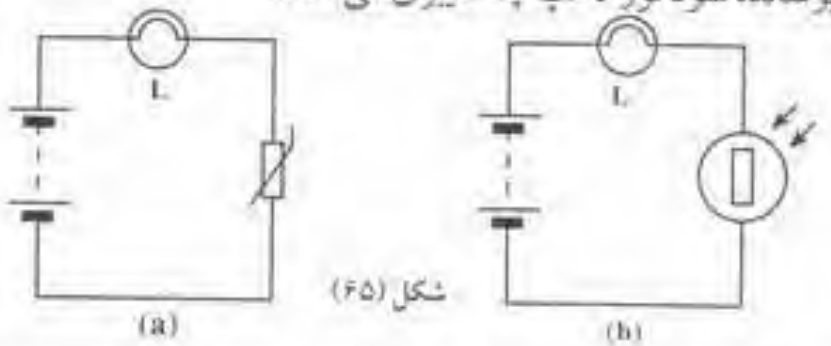
۲ـ اصطلاحات مبدلهای ورودی و خروجی در سیستمهای الکترونیکی را توضیح دهید.

۳ـ با مراجعه به شکل (۶۵) به سؤالات زیر پاسخ دهید:

الف: در شکل (a ـ ۶۵) اگر ترمیستور از نوع PTC باشد و گرم شود نور لامپ چه تغییری می کند؟

ب: در شکل (a ـ ۶۵) اگر ترمیستور از نوع NTC باشد و گرم شود نور لامپ چه تغییری می کند؟

ج: در شکل (b ـ ۶۵) اگر در شرایط روشنایی روز، لامپ روشن باشد، درصورتی که روی LDR پوشانده شود نور لامپ چه تغییری می کند؟



شکل (۶۵)

۴ـ شش وسیلهٔ خانگی را نام ببرید که در آن از موتور الکتریکی استفاده شده باشد.

۵ـ چهار وسیلهٔ خانگی را نام ببرید که در آن انرژی الکتریکی به گرمایی تبدیل می شود.

۱ـ LED: Light Emitting Diode

فصل اوّل

بررسیهای کلّی

هدفهای رفتاری : فراگیر در پایان این فصل خواهد توانست :

۱ ـ اتم را تعریف کند .

۲ ـ قسمتهای اصلی اتم را نام ببرد .

۳ ـ تعداد الکترونهای یک اتم را با استفاده از رابطه $2n^2$ به دست آورد .

۴ ـ لایه والانس و الکترون والانس را تعریف کند .

۵ ـ هادیها ، نیمه هادیها و عایقها را تعریف کند .

۶ ـ باندهای انرژی هادیها ، نیمه هادیها و عایقها را توضیح دهد .

۱ ـ ۱ ـ مقدّمه

عناصر در طبیعت از ذرّات بسیار کوچکی به نام اتم تشکیل شده اند که دارای دو قسمت اصلی هسته و پوسته های الکترونی می باشند . الکترونهای هراتم روی مدارهایی بیضی شکل دوران می کنند . تعداد حداکثر الکترونهای هر مدار ، از رابطه $2n^2$ تعیین می گردد .

در این رابطه ، n شماره لایه (پوسته) مورد نظر می باشد وبا حروف K ، L ، M ، N ، O ، P و Q مشخّص می شود . مطالب فوق را به صورت یک مدار لایه ای ، در شکل (۱ ـ ۱) می توان نشان داد .

شکل (۱ـ۱) حداکثر لایه های یک اتم

در شکل (۱ـ ۱) به طوری که دیده می شود، Kلایهٔ شماره ۱، Lلایهٔ شمارهٔ ۲، Mلایهٔ شماره۳، . . . و Qلایهٔ شماره ۷ می باشد.

اکنون برای دانستن اینکه هر لایه با چند الکترون پر می شود یا حداکثر الکترونهایی که یک لایه می پذیرد چندتاست در رابطهٔ $2n^2$ به جای n، شماره مدار لایه را قرار می دهیم تا حداکثر الکترونی که در آن لایه قرار دارد به دست آید.

مثال ۱ : تعداد حداکثر الکترونهای لایه Kچند تاست؟

حل : چون لایهٔ K لایهٔ شمارهٔ یک است. در رابطهٔ $2n^2$ ، به جای n ،عدد یک را قرارمی دهیم.

$2n^2 = 2\times1^2 = 2$ الکترون

یعنی لایهٔ شماره ۱ (K) حداکثر ۲ الکترون می پذیرد.

مثال ۲ : لایه های L، M، . . . وQ به ترتیب حداکثر با چند الکترون پر می شوند؟

حل:

L لایهٔ $\rightarrow n=2$

$L = 2n^2 = 2\times2^2 = 8$ الکترون

یعنی لایهٔ دوم (L)با ۸ الکترون پر می شود.

Mلایهٔ $\rightarrow n=3$

$M = 2n^2 = 2\times3^2 = 18$ الکترون

لایهٔ سوم(M) نیز حداکثر با ۱۸ الکترون پرمی شود.

Nلایهٔ $\rightarrow n=4$

$N = 2n^2 = 2\times4^2 = 32$ الکترون

Oلایهٔ $\rightarrow n=5$

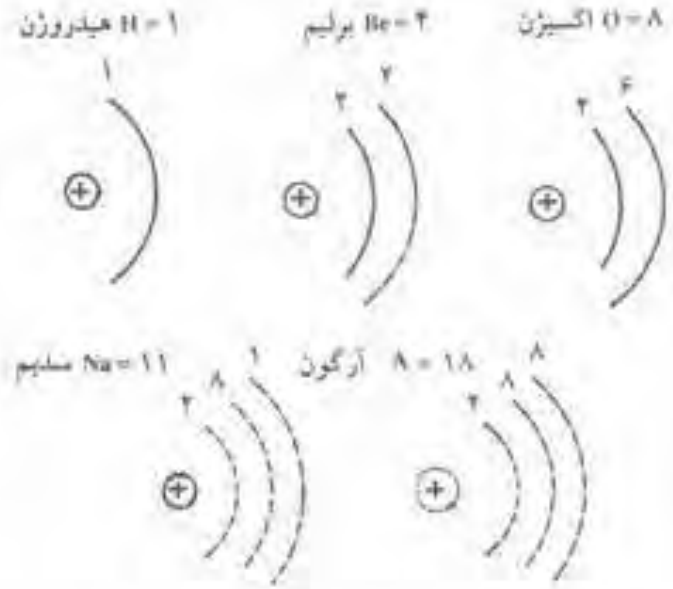
$O = 2n^2 = 2\times5^2 = 50$ الکترون

به همین ترتیب لایهٔ P با ۷۲ و لایه Q با ۹۸ الکترون کامل می شود. پس به طور کلّی، می توان گفت که لایهٔ K با ۲ الکترون، لایهٔ L با ۸ الکترون، لایهٔ M با ۱۸ الکترون، لایهٔ N با ۳۲ الکترون و . . . کامل می شوند.

اکنون برای درک بهتر با نحوه پرشدن لایه ها، ابتدا ظرفیّت لایه و سپس لایه والانس والکترونهای والانس را شرح می دهیم.

۲ـ۱ـ ظرفیّت لایه

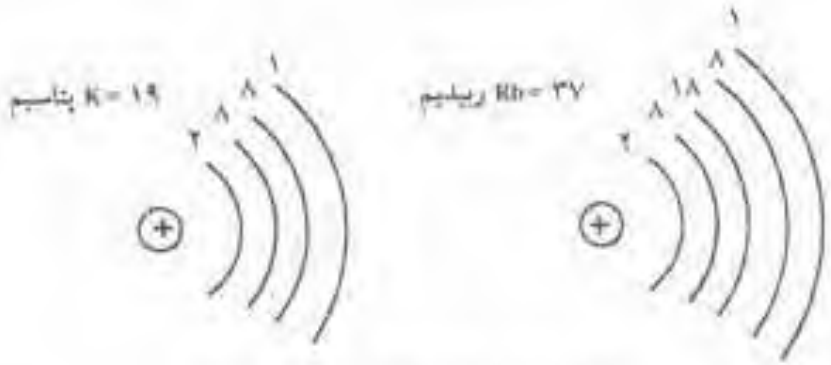
به طوری کـه گفتـه شـد، لایهٔ اوّل نمی تواند بیش از ۲ الکترون، لایهٔ دوم بیش از ۸ الکترون، M و N بیش از ۱۸ و ۳۲ الکترون را بپذیرند. ولی با توجّـه به عدد اتمی عناصر، باید گفت که تا عدد اتمی ۱۰، لایهٔ اوّل با ۲ و لایهٔ دوم با ۸ الکترون کامل می شود وچون این آخرین حدّ برای لایه دوم است باید لایهٔ سوم شـروع شود. برای عناصری با عدد اتمی ۱۱ تا ۱۸ لایهٔ اوّل با ۲ الکترون، لایهٔ دوم با ۸ الکترون و لایهٔ سوم با ۸ الکترون پر می شود و پس از آن لایهٔ چهـارم شروع می شـود. برای عناصری با عـدد اتمی ۱۹ تا ۲۹ ابتدا لایـهٔ سوم با حداکثر ظرفیّت یعنی ۱۸ الکترون پر می شود و پس از آن لایهٔ چهارم شروع می گردد. شکل (۲ـ۱) مدار لایه ای تعدادی عناصر را با عدد اتمی آنها نشان می دهد.



شکل (۲ـ۱) لایه های اتم بعضی از عناصر و عدد اتمی آنها

۳ـ۱ـ لایهٔ والانس والکترون والانس

با توجّه به مطالب فوق، اگـر چه لایه سوم می تواند تا ۱۸ الکترون داشتـه باشد ولی هرگز قبل از اینکه لایهٔ چهارم شروع شود بیش از ۸ الکترون نمی پذیرد. در مورد لایهٔ چهارم نیز، این مطلب صادق است؛ یعنی، با وجود اینکه لایهٔ چهارم می تواند حداکثر ۳۲ الکترون بپذیرد اما هرگز قبل از شروع لایهٔ پنجم بیشتر از ۸ الکترون را قبول نمی کند. این یک قانون کلّی است. شکل (۳ـ۱) این مطلب را به خوبی نشان می دهد.



شکل (۳ـ۱) مدار لایه ای پتاسیم و ریبیدیم

آخرین لایهٔ (لایهٔ خارجی) هر اتم نمی تواند بیشتر از ۸ الکترون داشته باشد. به آخرین لایهٔ هر اتم لایهٔ والانس می گویند و الکترونهای آن نیز الکترونهای والانس یا ظرفیّت، نامیده می شوند.

۴ـ۱ ـ هدایت در اجسام

کلیه اجسام موجود در طبیعت، از نظر هدایت الکتریکی به سه دسته کلّی تقسیم می شوند:

۱ـ هادیها یا اجسامی که به راحتی جریان برق را از خود عبور می دهند.

۲ ـ نیمه هادیها یا اجسامی که تحت شرایطی (از جمله، انرژی خارجی مانند: گرما و . . .) جریان برق را به مراتب کمتر از هادیها، از خود عبور می دهند.

۳ـ عایقها یا اجسامی که جریان برق را از خود عبور نمی دهند.

۱ـ۴ـ۱ـ هادیها: اجسامی می توانند جریان برق را از خود عبور دهند که دارای الکترون آزاد باشند. هادیها، اجسامی هستند که اتمهای آنها به راحتی الکترون والانس خود را از دست داده، دارای بار الکتریکی مثبت می شوند. لذا می توانند به راحتی، جریان برق را از خود عبور دهند. فلزّات یک تا سه ظرفیّتی مانند مس، نقره و آلومینیم، هادیهای خوبی هستند زیرا دارای الکترونهای آزاد بسیار زیادی می باشند. علاوه بر فلزّات، بعضی از اسیدها، قلیاها و نمکها نیز جزو هادیها به شمار می روند.

۲ـ۴ـ۱ـ نیمه هادیها: نیمه هادیها، اجسامی هستند که مدار آخر آنها دارای ۴ الکترون می باشد. (گروه چهارم جدول مندلیف) این اجسام در صفر درجه مطلق تقریباً عایق هستند ولی در درجهٔ حرارت معمولی (۲۵ درجه سانتیگراد) تقریباً هادی می باشند امّا هدایت آنها به مراتب کمتر از هادیهاست. ازانواع نیمه هادیها می توان کربن، سیلیسیم و

ژرمانیم را نام برد.

۳ـ۴ـ۱ـ عایقها : عایقها، اجسامی هستند که در شرایط معمولی، جریان برق را از خود عبور نمی دهند؛ زیرا، الکترون آزاد آنها بسیار کم است. مانند : کائوچو، شیشه، هوا، روغن، پلاستیک و ....

۵ـ۱ـ باندهای انرژی هادیها، نیمه هادیها و عایقها

همانطور که می دانیم در فعل و انفعالات شیمیایی و ترکیبات اجسام با یکدیگر، فقط الکترونهای مدار آخر هر اتم، شرکت می کنند. لذا، ظرفیّت هر جسم، بستگی به تعداد الکترونهای مدار آخر هر اتم آن دارد. مثلاً، آلومینیم که سه ظرفیّتی است در مدار آخر اتم آن، سه الکترون وجود دارد. اگر اتمی الکترون از دست بدهد، الکترون مدار آخر را از دست می دهد و یا اگر الکترونی بگیرد این الکترون در مدار آخر اتم جای می گیرد. ناگفته نماند که در مدارات ماقبل آخر نیز، الکترونها در سطوح مختلف، جا به جا (رفت و برگشت) می شوند. ولی اغلب در ترکیبات شیمیایی شرکت نمی کنند.

> الکترونهای آخرین مدار هر اتم را، الکترونهای ظرفیّت می نامند.

همانطور که گفته شد، شرط اینکه در یک جسم جریان برق جاری گردد این است که جسم باید دارای الکترون آزاد باشد. انرژی لازم برای آزاد کردن الکترونهای ظرفیّت هادیها، بسیار کم و مقدار آن در حدود ۰/۰۱ الکترون ـ ولت (e V) [1] می باشد.

در نیمه هادیها، مقدار انرژی لازم برای آزاد کردن الکترونهای ظرفیّت اتمها، بیشتر از هادی می باشد (حدود ۰/۵ تا ۱/۵ الکترون ـ ولت که مقدار دقیق آن بستگی به نوع نیمه هادی دارد).

در عایقها، مقدار انرژی لازم برای آزاد سازی الکترونهای ظرفیّت، زیاد می باشد ولی این مقدار برای تمامی عایقها یکسان نیست و بستگی به نوع عایق دارد.

مراحل آزاد کردن الکترونها از مدار آخر اتمها را، توسّط انرژی خارجی در هادیها، نیمه هادیها و عایقها به صورت نوارهای باند ظرفیّت، باند ممنوع و باند هدایت، طبق شکل

---

۱ ـ الکترون ـ ولت واحد انرژی است و آن، مقدار انرژی است که یک الکترون هنگام انتقال از یک نقطه به نقطه دیگر با اختلاف پتانسیل یک ولت، کسب می کند. چون بار الکترون $۱/۶\times۱۰^{-۱۹}$ کولن می باشد، پس :
ژول $۱eV = ۱/۶\times۱۰^{-۱۹}\times۱ = ۱/۶\times۱۰^{-۱۹}$

(۴ـ۱) نشان می دهند.

باند هدایت : دراین باند الکترونهای آزاد با تحریک خارجی از جمله میدان الکتریکی می توانند به راحتی در داخل اجسام به حرکت در آیند.

باند ممنوع : این باند نشان می دهد که چه مقدار انرژی لازم است تا الکترونها از مدار آخر آزاد گردند.

باند ظرفیت : دراین باند الکترونهای لایه آخر هراتم، با تحریک انرژی خارجی از مدار جدا می شوند.

شکل (۴ ـ ۱) باندهای انرژی به صورت کلی

برای نشان دادن تقریبی باندهای انرژی هادیها، نیمه هادیها و عایقها از شکل (۵ـ ۱) استفاده می شود. کم و زیاد بودن فاصله باندها نشان دهنده مقدار انرژی کم و زیاد برای هدایت جسم می باشد.

شکل (۵ـ ۱) باندهای تقریبی انرژی هادیها، نیمه هادیها و عایقها

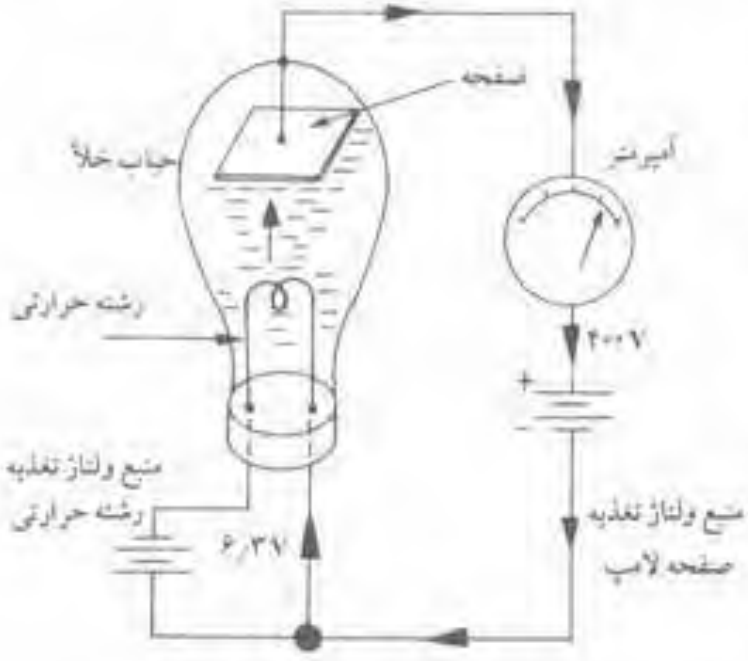
۶ـ۱ـ مقدمه ای بر لامپهای خلأ

۱ـ۶ـ ۱ـ تجربه ای از ادیسون: آیا می دانید مخترع لامپ روشنایی چه کسی است؟ توماس ادیسون در یک تحقیق و تجربه طولانی موفق شد لامپ روشنایی را اختراع کند و به

جهان روشنایی بخشد. وی دریافت که در اثر عبور جریان الکتریکی از یک سیم مقاومت دار، سیم گرم شده و در اثر افزایش جریان سیم سرخ می‌شود. چنانچه افزایش جریان ادامه یابد در اثر گرمای زیاد سیم ملتهب شده و از خود نور می‌تاباند ولی به علت ترکیب با اکسیژن هوا تابش نور تداوم نمی‌یابد و سیم می‌سوزد. برای جلوگیری از اکسیداسیون رشته حرارتی، سعی کرد آن را در محیطی قرار دهد تا اکسیژن نباشد. لذا تجربه خود را در یک حباب خلأ انجام داد و مشاهده کرد که رشته حرارتی می‌تواند از خود نور زرد تولید کند. بدین ترتیب اولین لامپ روشنایی ساخته شد. بعدها با استفاده از فلز تنگستن بعنوان رشته حرارتی، لامپ روشنایی تکامل یافت و به صورت لامپ روشنایی فعلی به جامعه عرضه شد.

۲ـ۶ـ۱ـ سحر و جادو در تجربه ادیسون: ادیسون در ادامه تحقیقات خود با مسئله عجیبی روبرو شد که ابتدا آن را سحر و جادو نامید. او در یکی از تجربه‌های خود طبق شکل (۶ـ۱) مشاهده کرد که با وجود خلأ در داخل لامپ جریان الکتریکی در مدار خارجی برقرار است. با توجه به اینکه خلأ از نظر الکتریکی عایق است ابتدا این مسئله غیرممکن به نظر می‌رسید.

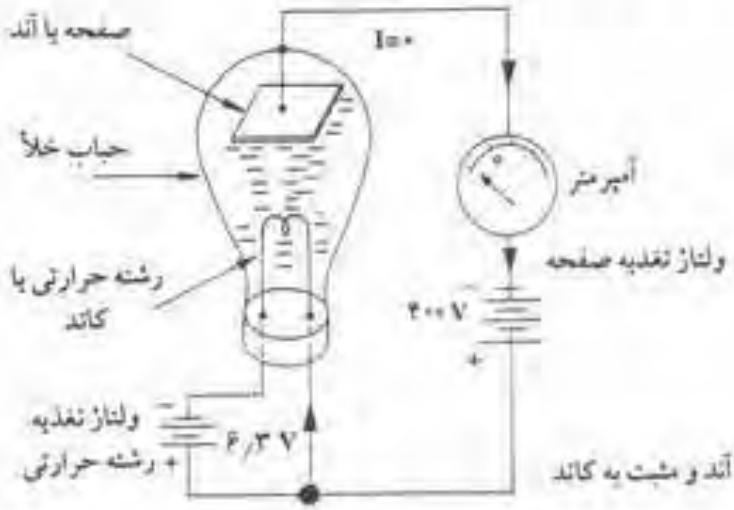
۳ـ۶ـ۱ـ علت عبور جریان از حباب خلأ چیست؟: ادیسون بعدها دریافت که علت برقراری جریان الکتریکی در مدار، انتشار الکترون از رشته حرارتی است. این الکترونها که دارای بار منفی هستند پس از عبور از خلأ جذب صفحه‌ای که دارای بار الکتریکی مثبت است می‌شوند و جریان الکتریکی را در مدار خارجی برقرار می‌نمایند. این پدیده را انتشار ترمویونیک[1] یا انتشار الکترون در اثر گرما می‌نامند.



شکل (۶ـ۱) عبور جریان از حباب خلأ

۱ـ Thermionic

۴ـ۶ـ۱ـ تعویض قطبهای باطری: تحقیقات ادیسون ادامه یافت تا اینکه روزی تصادفی جهت قطب منبع تغذیه متصل به صفحه را طبق شکل (۷ ـ ۱) عوض کرد و با کمال تعجب مشاهده کرد که جریانی در مدار برقرار نمی‌شود. مجدداً مدار را به حالت شکل (۶ـ۱) درآورد مشاهده کرد جریان الکتریکی در مدار جاری شد، از این تجربیات نتیجه گیری کرد که حباب خلأ در یک جهت، جریان الکتریکی را عبور می‌دهد و در جهت دیگر جریان الکتریکی را متوقف می‌سازد. علت عدم برقراری جریان الکتریکی نیروی دافعه موجود بین صفحه و الکترونها است که هر دو دارای بار منفی می‌باشند.



شکل (۷ ـ ۱) تعویض قطبین باتری منفی به آند و مثبت به کاتد

۵ـ۶ـ۱ـ نامگذاری حباب خلأ: پس از تجربیات فوق، ادیسون، حباب خلأ را لامپ خلأ[1] نامید و به علت اینکه در این لامپ از دو الکترود یا دو قطب استفاده شده بود نام لامپ دیود[2] (دوقطبی) را برای آن انتخاب کرد. رشته حرارتی را که الکترون پخش می‌کند کاتد[3] و صفحه‌ای را که الکترون جذب می‌کند آند[4] می‌نامند. علامت اختصاری لامپ دیود و شکل ظاهری آن در شکل (۸ـ۱) نشان داده شده است.

(ب) (الف)

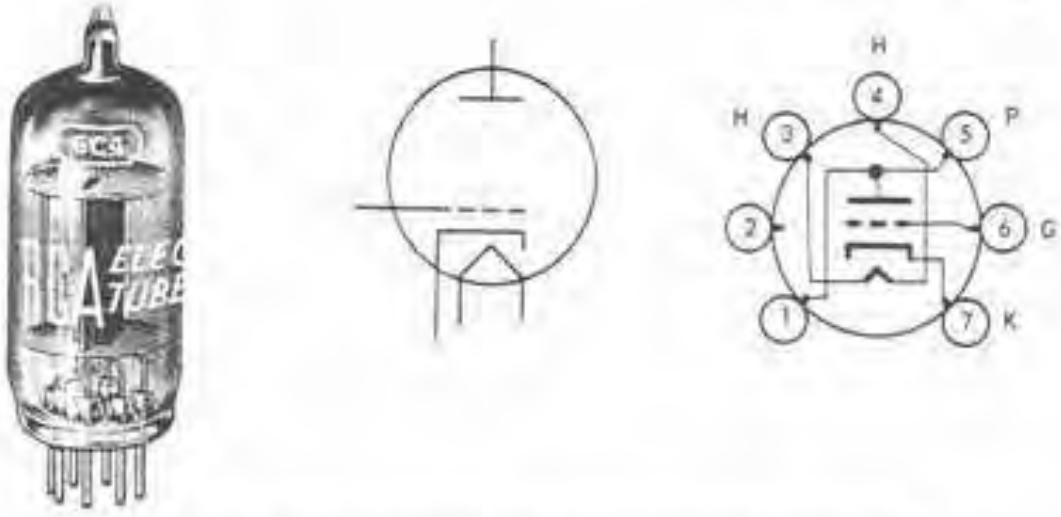
شکل (۸ ـ ۱) الف ـ علامت اختصاری لامپ دیود ب ـ شکل ظاهری لامپ دیود

۱ـ Vacuum tube ۲ـ Diode ۳ـ Cathode ۴ـ Anode

۶ـ۶ـ۱ـ کاربرد لامپ دیود و تکامل لامپهای خلأ: در گذشته از لامپهای دیود به عنوان یکسوساز در تبدیل ولتاژ متناوب (AC) به ولتاژ مستقیم (DC) استفاده می شد که به دنبال آن لامپهای خلأ تکامل یافت و لامپهای تریود[۱] (سه قطبی)، تترود[۲] (چهارقطبی)، پنتد[۳] (پنج قطبی) و . . . ساخته شد که با توجه به علم روز تحول شگفت آوری در زمینه علم الکترونیک محسوب می گردید. با ساخت لامپهای مزبور مدارهای مختلف الکترونیکی از قبیل تقویت کننده، رادیو و . . . شکل گرفت. برای آشنایی بیشتر با لامپهای خلأ شرح مختصری از ساختمان لامپ تریود را در زیر می آوریم.

۷ـ۶ـ۱ـ خلاصه ای از ساختمان لامپ تریود: لامپ تریود در واقع همان لامپ دیود است که جریان آند و کاتد آن قابل کنترل می باشد. برای کنترل جریان آند و کاتد معمولاً یک استوانه مشبک بین آند و کاتد قرار می دهند که آن را شبکه فرمان (grid) یا شبکه کنترل می نامند. با اعمال ولتاژ منفی به شبکه فرمان، الکترونها نمی توانند به آسانی از شبکه عبور کنند و به آند برسند. بدین ترتیب با کم و زیاد کردن ولتاژ منفی شبکه فرمان، می توان جریان لامپ را کنترل کرد.

لامپ تریود به عنوان تقویت کننده و نوسانساز در مدارهای الکترونیکی استفاده شده است. در شکل (۹ـ۱) علامت اختصاری لامپ تریود و شکل ظاهری آن آمده است. خط چین در وسط لامپ علامت اختصاری شبکه فرمان می باشد. شماره پایه های لامپ نیز در شکل نشان داده شده است.



شکل (۹ـ۱) تصویر ظاهری لامپ تریود، مشخصات پایه ها و علامت اختصاری آن

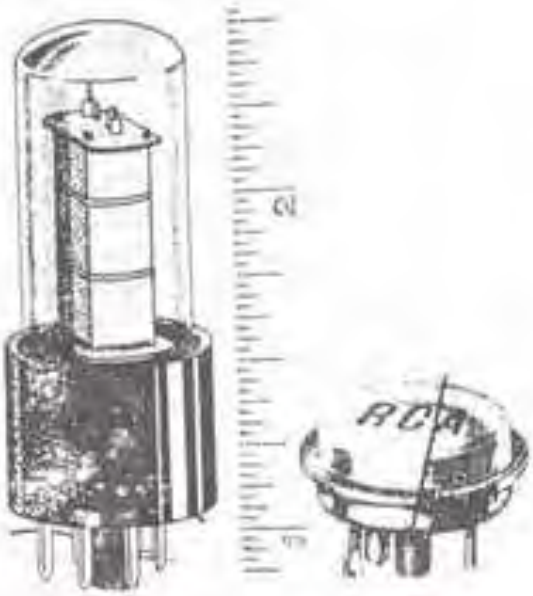
۱ـ Triode ۲ـ Tetrode ۳ـ Pentode

۸ـ۶ـ۱ـ جایگزینی نیمه هادیها به جای لامپهای خلأ: به علت کشف نیمه هـادیها، لامپهای خلأ نتوانستند به‌مدت طولانی دوام پیدا کنند و در دستگاههای الکترونیکی مـورد استفاده قرار گیرند، زیرا به تدریج قطعات نیمه هـادی از قبیل دیود و ترانزیستور جایگزین لامپها شدند و در مدت بسیار کمی استفـاده از لامپها در دستگاههای الکترونیکی معمولی کنار گذاشته شد ولی به علت خاصیت های ویژه ای که لامپهای خـلأ در قدرت های بالا و فرکانسهـای بالا دارند نتوانستند آنها را کاملاً از رده خارج کنند. امروزه از لامپهای خلأ در اسیلوسکوپ، لامپ تصویر تلویزیون، رادار، صفحه نمایش کامپیوتر، دستگاه مولد اشعه X، طبقات خروجی فرستنده‌های پر قدرت و سیستم های مایکروویو استفاده می شود شکل (۱۰ـ۱).

مقایسه لامپهای خلأ با ترانزیستور: به منظور آشنایی بیشتر به علل از رده خارج شدن لامپهای خلأ در دستگاههای الکترونیکی، مقایسه ای مصور بین لامپ خلأ و ترانزیستور در شکل های (۱۱ـ۱)، (۱۲ـ۱)، (۱۳ـ۱) و (۱۴ـ۱) نشان داده شده است.

علاوه بر موارد فوق، حرارت تولید شده در لامپها بسیار بیشتر از ترانزیستورها است.

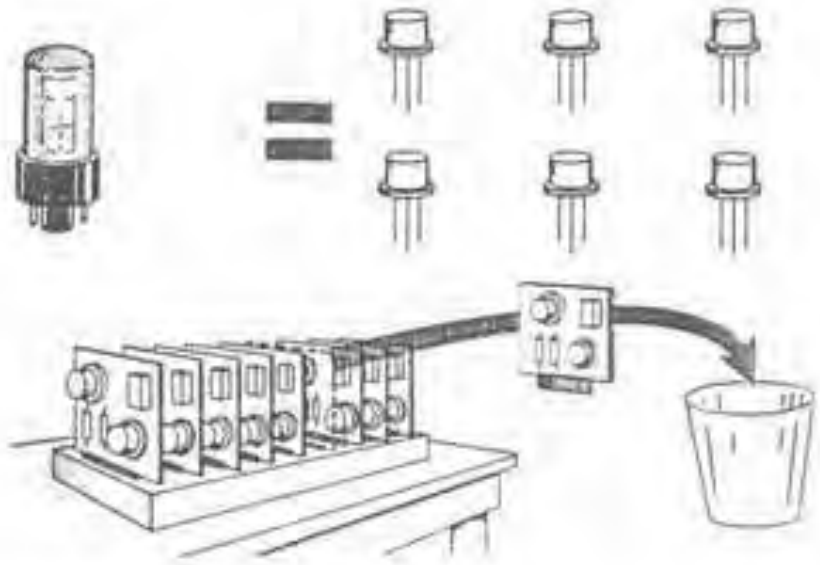
شکل (۱۰ ـ ۱) تصویر کامل لامپ پرتو کاتودی



شکل (۱۱ ـ ۱) لامپها از ترانزیستورها بزرگ تر و حجیم تر است.

شکل (۱۲ـ۱) قدرت مصرفی لامپها بیشتر از ترانزیستورها است.

شکل (۱۳ـ۱) عمر ترانزیستورها بیشتر از لامپها است.



شکل (۱۴ـ۱) به علت ارزانی قیمت وسایل ترانزیستوری را می توان به صورت یکبار مصرف ساخت.

پرسش

۱ـ اتم را تعریف کنید.

۲ـ قسمتهای اصلی اتم را نام ببرید.

۳ـ تعداد الکترونهای لایه سوم و پنجم را به دست آورید.

۴ـ لایه والانس را تعریف کنید.

۵ـ الکترون والانس را تعریف کنید.

۶ـ اجسام از نظر هدایت به چند دسته تقسیم می شوند؟ نام ببرید.

۷ـ هادی را تعریف کرده، توضیح دهید. هادیهای خوب دارای چه خصوصیاتی هستند؟

۸ـ نیمه هادی را تعریف کرده، چند نوع آن را نام ببرید.

۹ـ عایق را تعریف کنید.

۱۰ـ در مورد باندهای انرژی هادیها، نیمه هادیها و عایقها توضیح دهید.

۱۱ـ علت استفاده از حباب خلأ درتجربه ادیسون را شرح دهید.

۱۲ـ پدیده ترمودینامیک را توضیح دهید.

۱۳ـ در شکل (۷ـ۱) به چه دلیل جریان الکتریکی در مدار برقرار نمی شود؟

۱۴ـ نقش شبکه فرمان در لامپ تریود چیست؟

۱۵ـ مزایای ترانزیستور را بر لامپ خلأ نام ببرید.

فصل دوم

بررسی ساختمان نیمه هادیها و چگونگی تشکیل نیمه هادی نوع N و P

هدفهای رفتاری : فراگیر در پایان این فصل خواهد توانست :

۱ ـ باندهای انرژی ژرمانیم و سیلیسیم را توضیح دهد .

۲ ـ ساختمان اتمی ژرمانیم و سیلیسیم را تشریح کند .

۳ ـ نحوهٔ اتصال اتمهای کریستال ژرمانیم و سیلیسیم (شبکه کریستالی) را توضیح دهد .

۴ ـ هدایت الکتریکی در کریستال ژرمانیم و سیلیسیم را بررسی کند .

۵ ـ حفره را تعریف کند .

۶ ـ چگونگی حرکت الکترون و حفره را در داخل کریستال توضیح دهد .

۷ ـ چگونگی ناخالص کردن کریستال نیمه هادی برای تشکیل نیمه هادی نوع N را، شرح دهد .

۸ ـ چگونگی ناخالص کردن کریستال نیمه هادی برای تشکیل نیمه هادی نوع P را، بیان کند .

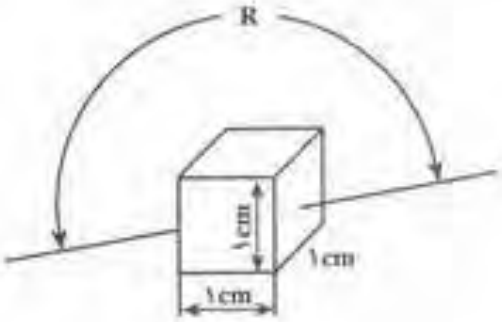
۱ ـ ۲ ـ انواع نیمه هادیها

نیمه هادیها ، از نظر هدایت الکتریکی بدتر از فلزات ولی بهتر از عایقها هستند . مدار آخر نیمه هادیها ، دارای ۴ الکترون می باشد . جدول (۱ ـ ۲) چند نوع نیمه هادی را که کاربرد بیشتری دارند نشان می دهد .

برای مقایسهٔ گروه نیمه هادیها با اجسام هادی و عایق ، که قبلاً نیز به آن اشاره شد ، از مقاومت مخصوص آنها استفاده می شود . مقاومت مخصوص به وسیله قطعه ای از ماده به طول یک سانتیمتر و سطح مقطع یک سانتیمتر مربع ، مطابق شکل (۱ ـ ۲) ، نشان داده می شود . مقاومت مخصوص را با ρ نمایش می دهند . واحد ρ اهم سانتیمتر است که از رابطهٔ $\rho = \frac{RS}{l} = \frac{\Omega.cm^2}{cm} = \Omega.cm$ حاصل می شود .

نام عنصر	علامت شیمیایی	عدد اتمی
کربن	C	۶
سیلیسیم	Si	۱۴
ژرمانیم	Ge	۳۲
توریم	Tm	۹۰
زیرکونیم	Zr	۴۰
هافنیوم	Hf	۷۲

جدول (۱ ـ ۲) انواع نیمه هادیها



شکل (۱ـ۲) نمایش یک اهم سانتیمتر

جدول (۲ ـ ۲) مقاومت مخصوص برای سه نوع مواد مختلف را نشان می دهد .

عایق	نیمه هادی		هادی
میکا	سیلیسیم	ژرمانیم	مس
$\rho = ۱۰^{۱۲}\,\Omega.cm$	$\rho = ۵۰ \times ۱۰^{۳}\,\Omega.cm$	$\rho = ۵۰\,\Omega.cm$	$\rho = ۱/۷۸ \times ۱۰^{-۶}\,\Omega.cm$*

جدول (۲ ـ ۲) مقاومت مخصوص مواد مختلف در دمای $۳۰۰^{\circ}K$

---

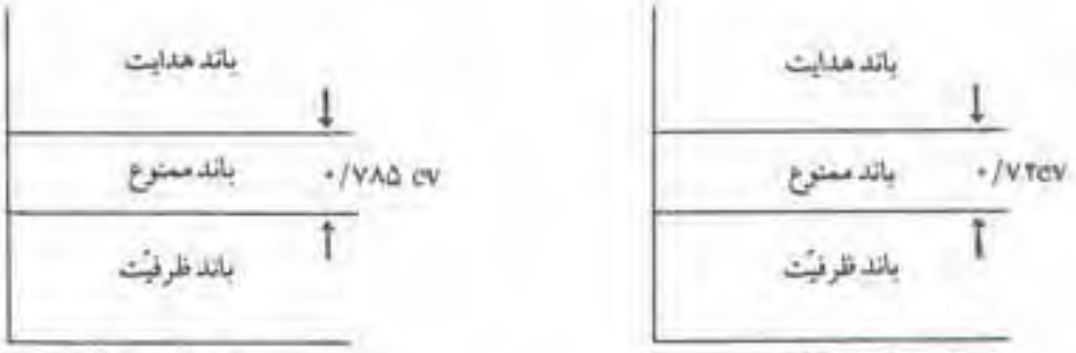
* $۱\Omega.cm = ۱۰^{۴}\,\Omega\frac{mm^{۲}}{in}$

۲ ـ ۲ ـ باندهای انرژی نیمه هادیها

نیمه هادیهای ژرمانیم و سیلیسیم ، به علت کاربردشان در ساخت قطعات الکترونیکی ، نسبت به بقیه از اهمیّت زیادتری برخوردارند . در اینجا فقط باندهای انرژی ژرمانیم و سیلیسیم را مورد بررسی قرار می دهیم .

شکل (۲ـ ۲) باندهای انرژی ژرمانیم را ، در دو درجه حرارت صفر و $300^{\circ}K$ نشان می دهد .

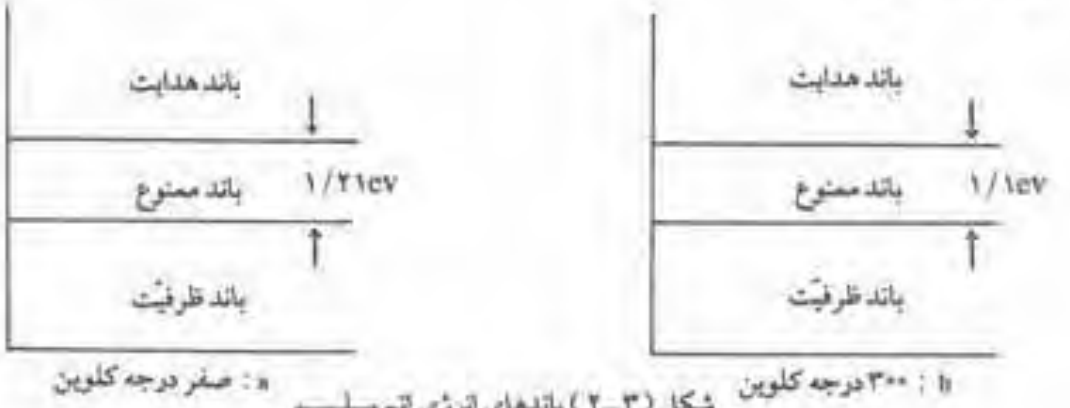
انرژی لازم برای عبور الکترون ازمنطقهٔ ممنوعه در اتم ژرمانیم ، حدود ۰/۷ الکترون ولت می باشد .



شکل (۲ـ۲) باندهای انرژی اتم ژرمانیم

شکل (۳ـ ۲) باندهای انرژی سیلیسیم را در دودرجهٔ حرارت صفر و $300^{\circ}K$ نشان می دهد .

انرژی لازم جهت عبور الکترون از منطقهٔ ممنوعه در اتم سیلیسیم حدود ۱/۲ الکترون ولت می باشد .

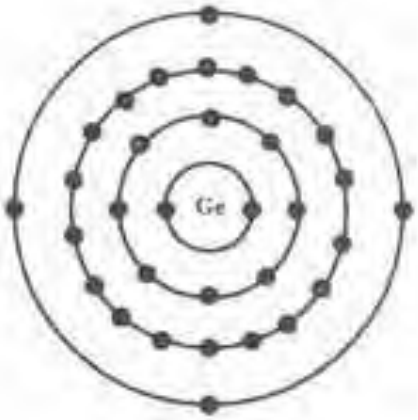


شکل (۳ـ۲) باندهای انرژی اتم سیلیسیم

۳ ـ ۲ ـ ساختمان اتمی ژرمانیم و سیلیکون

ژرمانیم دارای عدد اتمی ۳۲ می باشد . الکترونهای لایه های آن به ترتیب عبارتند از :

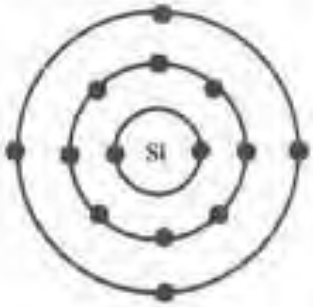
۲ـ۸ـ۱۸ـ۴ که نمای اتمی آن در شکل (۴ـ۲) نشان داده شده است .



شکل (۴ـ۲) نمای اتمی ژرمانیم

این نیمه هادی ، در سال ۱۸۸۶ توسط وینکلر (Winkler) کشف شد . ژرمانیم ، دارای چگالی ۵/۳۲ گرم بر سانتیمتر مکعب است و در حرارت ۹۳۷/۴ درجه سانتیگراد ذوب می شود .

سیلیسیم، دارای عدد اتمی ۱۴ می باشد و الکترونهای لایه های آن به ترتیب عبارتند از ۲ـ۴ـ۸ که نمای اتمی آن در شکل (۵ـ۲) نشان داده شده است .

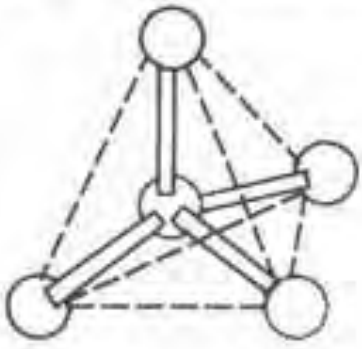


شکل (۵ـ۲) نمای اتمی سیلیسیم

این نیمه هادی ، در سال ۱۸۱۰ توسط گیلوساک (Gilosake) و تنارد(Tanard) کشف شد . سیلیسیم در حرارت ۱۴۱۰ درجه سانتیگراد ذوب می شود و دارای چگالی ۲/۳۳ گرم بر سانتیمتر مکعب می باشد .

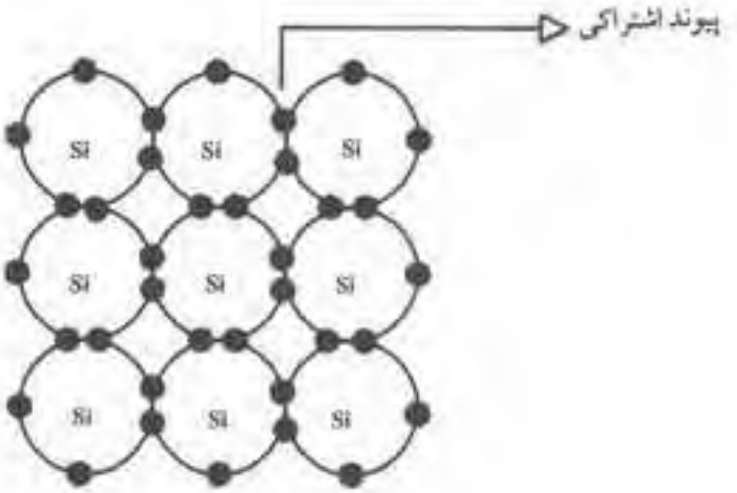
۴ـ۲ـ ساختمان کریستالی ژرمانیم و سیلیسیم

اتمهای نیمه هادی ژرمانیم و سیلیسیم ، به صورت یک بلورسه بُعدی ، مطابق شکل (۶ـ۲) ، می باشند که با کنار هم قرار گرفتن بلورها ، شبکه کریستالی آنها پدید می آید .



شکل (۶ـ۲) ساختمان تک کریستالی ژرمانیم و سیلیسیم

اتم ژرمانیم ، دارای ۳۲ الکترون و اتم سیلیسیم ، دارای ۱۴ الکترون می باشد . در هر حال ، تعداد الکترونهای مدار آخر هر دوی آنها ۴ است . لذا مدار آنها کامل[1] نبوده ، می توانند تعدادی الکترون بگیرند . با کنار هم قرار گرفتن اتمهای ژرمانیم یا سیلیسیم ، الکترونهای مدار آخر آنها به اشتراک می گذارند تا مدار آخرشان کامل شود . شکل (۷ـ ۲) تعدادی از اتمهای سیلیسیم را که با هم تشکیل پیوند اشتراکی داده اند نشان می دهد که مشابه آن در مورد ژرمانیم صدق می کند .



شکل (۷ـ۲) شبکه کریستالی سیلیسیم

همانطوری که در شکل (۷ـ ۲) دیده می شود ، هر اتم ، چهار الکترون را از اتمهای مجاور خود ، به صورت اشتراکی دریافت نموده و مدار آخر خود را با هشت الکترون تکمیل کرده است . به این ترتیب ، اتمهای سیلیسیم و یا ژرمانیم تشکیل شبکه کریستالی می دهند ، (شبکه کریستالی به معنی شبکه منظّم می باشد) . لذا کریستال سیلیسیم و یا ژرمانیم یک عایق خوب می باشد ، زیرا فاقد الکترون آزاد است . (گر چه در درجهٔ حرارت معمولی ، به خاطر انرژی حرارتی ، تعدادی از پیوندهای اشتراکی شکسته شده ، سیلیسیم و یا ژرمانیم دارای الکترون آزاد می گردند .)

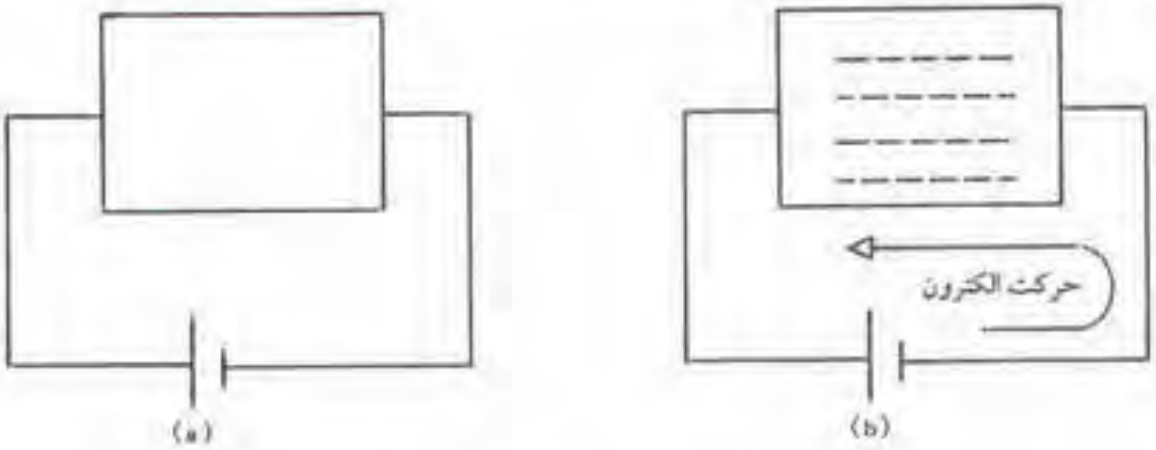
۵ ـ ۲ ـ هدایت الکتریکی در سیلیسیم و ژرمانیم خالص

یک قطعهٔ کریستال نیمه هادی سیلیسیم و یا ژرمانیم تا چه حد می تواند جریان الکتریکی را از خود عبور دهد؟ برای پاسخ به این سؤال ، یک قطعه کریستال ژرمانیم را به

---

۱ ـ مدار کامل به مداری گفته می شود که تعداد الکترونهای مدار آخر آن به ۸ برسد .

یک باتری وصل می کنیم . شکل (۸ـ۲) در درجهٔ حرارت صفر مطلق (۲۷۳ - درجه سانتیگراد) جریانی در مدار نخواهیم داشت . دلیل این امر ، عدم وجود الکترون آزاد در داخل کریستال می باشد ؛ زیرا تمام الکترونها خیلی محکم به اتمهای کریستال متّصلند و هیچ گونه انرژی خارجی از جمله گرما وجود ندارد تا پیوندها را شکسته ، تولید الکترون آزاد بنماید . لذا در صفر درجهٔ مطلق ، ژرمانیم و سیلیسیم ، عایق به شمار می آیند .



a: ژرمانیم خالص در درجهٔ حرارت صفر درجه کلوین

b: ژرمانیم خالص در درجهٔ حرارت بالاتر از صفر درجه کلوین

شکل (۸ـ۲) هدایت در ژرمانیم

با بالا رفتن درجهٔ حرارت ، انرژی گرمایی جذب الکترونهای آخرین مدار شده ، آنها را به ارتعاش در می آورد . با ازدیاد درجهٔ حرارت ، ارتعاشات زیاد شده تا جایی که پیوند می شکند و الکترون آزاد می گردد . هر چه درجه حرارت بالاتر رود ، تعداد بیشتری از پیوندها می شکنند و جریان در مدار افزایش می یابد .

الکترونی که از شکسته شدن پیوند ، آزاد می شود و به هیچ اتمی وابسته نیست الکترون آزاد نام دارد .

در یک درجه حرارت معیّن ، پهنای باند ممنوع در کریستال ژرمانیم ، کمتر از سیلیسیم می باشد . به این جهت در کریستال ژرمانیم نسبت به سیلیسیم ، پیوندهای بیشتری شکسته شده ، جریان بیشتری در مدار جاری می گردد .

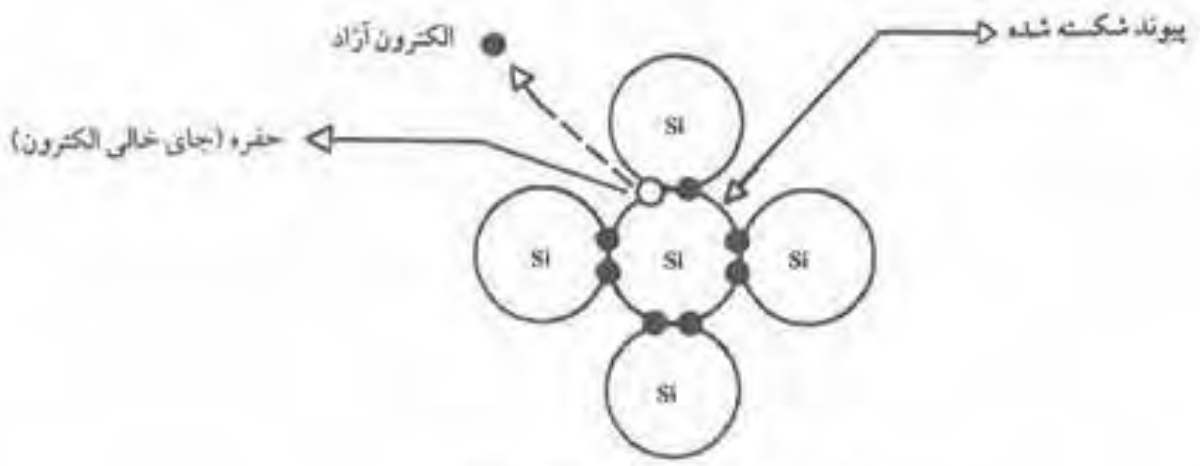
بنابراین لازم است که ، نکته زیر را دقیقاً به خاطر بسپارید :

در یک درجه حرارت معیّن ، تعداد الکترونهای آزاد در کریستال ژرمانیم بیشتر ازتعداد الکترونهای آزاد در کریستال سیلیسیم می باشد .

۶ـ۲ـ تئوری حفره ها

همانطوری که گفته شد ، در اثر انرژی خارجی (مثلاً گرما) پیوندها شکسته شده ، الکترون از اتم خود جدا می شود و اتم نیمه هادی ، کمبود الکترون پیدا می کند ، **جای خالی الکترون در اتم را حفره می نامند** .

یک حفره به منزله یک بار مثبت می باشد ، زیرا می تواند الکترونی را که از دست داده است ، دوباره بگیرد . در یک کریستال ژرمانیم و یا سیلیسیم خالص ، تعداد الکترونهای آزاد و حفره ها با هم برابرند . الکترونهای آزاد به طور نامنظّم ، درون کریستال در حال حرکتند . شکل (۹ـ۲) یک الکترون آزاد و یک حفره را که بر اثر شکسته شدن پیوند ، در یک کریستال نیمه هادی به وجود آمده اند ، نشان می دهد .

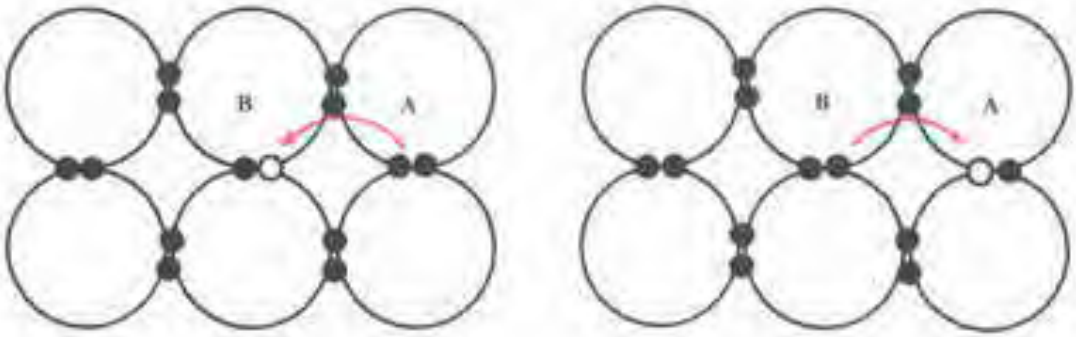


شکل (۹ـ۲) نمایش حفره و الکترون آزاد

۷ـ۲ـ حرکت الکترونها و حفره ها داخل کریستال نیمه هادی

بعد از شکستن پیوندها و ایجاد الکترونها و حفره ها ، الکترونها مرتّب جذب حفره ها شده ، از حالت آزاد بودن خارج می گردند و این عمل مرتب ادامه دارد . بنابراین ، الکترونها که داخل کریستال نیمه هادی حرکت می کنند ، وقتی از کنار حفره می گذرند ، به خاطر بار مثبت حفره ، جذب حفره می گردند . این عمل به طور منظم ادامه پیدا می کند . در شرایط معمولی ، یعنی هنگامی که نیروی خارجی اعمال نمی شود حرکت الکترونها و جذب شدن آنها توسّط حفره ها ، در کریستال به طور نامنظّم ادامه می یابد .

در صورت وجود انرژی گرمایی شکست پیوندها ادامه دارد . حرکت حفره ها عکس جهت حرکت الکترونهاست . البته حفره ها حرکت نمی کنند و همانطور که گفته شد حفره فقط جای خالی الکترون می باشد . حرکت حفره ها را می توان بدین صورت توجیه کرد : فرض می کنیم پیوند اتم A ، شکل (۱۰ـ۲) ، شکسته شده باشد و اتم B نیز قبلاً شکسته شده ، دارای حفره باشد . اگر الکترون آزاد ناشی از شکسته شدن اتم A جذب حفره اتم B گردد ، مثل این است که حفره اتم B به اتم A منتقل شده است .



(a) (b)

a : الکترون از اتم A جذب حفره اتم B می شود .

b : حفره اتم B به اتم A منتقل می گردد .

شکل (۱۰ـ۲) نمایش حرکت حفره و الکترون در جهت عکس یکدیگر

به طور خلاصه ، در هر لحظه اعمال زیر در کریستال نیمه هادی در حال انجام شدن می باشد .

۱ ـ بر اثر انرژی حرارتی ، در هر لحظه تعدادی از پیوندها شکسته می شوند و در نتیجه تعدادی الکترون آزاد شده ، حفره ها به وجود می آیند .

۲ ـ الکترونها و حفره ها با هم اتصال مجدد می یابند و این عمل باعث کم شدن الکترونها و حفره ها می گردد .

۳ ـ همیشه تعدادی الکترون آزاد و حفره در کریستال باقی می مانند .

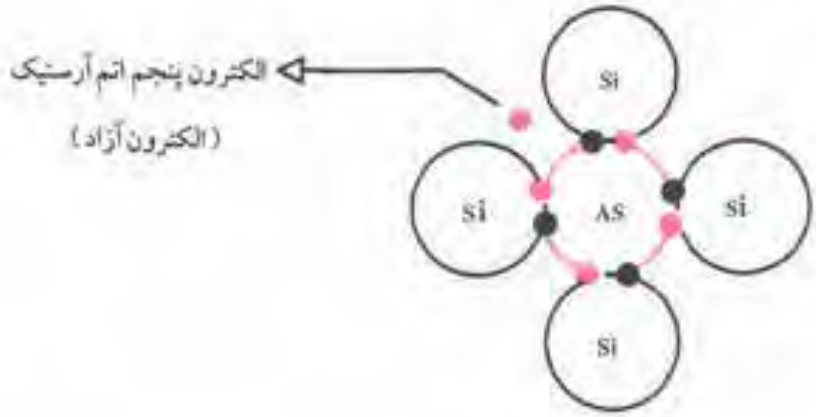
۴ ـ حرکت الکترونها و حفره ها عکس یکدیگر است .

۸ـ۲ ـ نیمه هادی نوع N و P

تعداد الکترونها و حفره های ایجاد شده در نیمه هادیها ، بر اثر انرژی گرمایی ، آنقدر

کم است که نمی‌توانند جریان زیادی را از خود عبور دهند (مقاومت اهمی آنها زیاد است) . در ضمن یک کریستال نیمه‌هادی خالص ، به صورت یک مقاومت اهمی معمولی عمل می‌کند . برای اینکه بتوانیم از یک نیمه‌هادی در کاربردهای ویژه‌ای (مثلاً ساخت دیود، ترانزیستور و . . .) استفاده نماییم ، باید آن را ناخالص کنیم . برای ناخالص کردن کریستال نیمه‌هادی ، عناصر با اتمهای پنج یا سه ظرفیّتی را به آن می‌افزاییم . این عناصر را عناصر ناخالصی[1] می‌نامند .

۱ ـ ۸ ـ ۲ ـ ناخالص کردن کریستال نیمه‌هادی با اتم پنج ظرفیّتی : اگر یک جسم پنج ظرفیّتی مانند آرسنیک و یا آنتیموان را به سیلیسیم و یا ژرمانیم بیفزاییم ، چهار الکترون مدار آخر آرسنیک با چهار اتم مجاور سیلیسیم و یا ژرمانیم تشکیل پیوند اشتراکی داده ، الکترون پنجم آن ، به صورت الکترون آزاد باقی می‌ماند . شکل (۱۱ ـ ۲)



شکل (۱۱ ـ ۲) ناخالص کردن با اتم ۵ ظرفیّتی

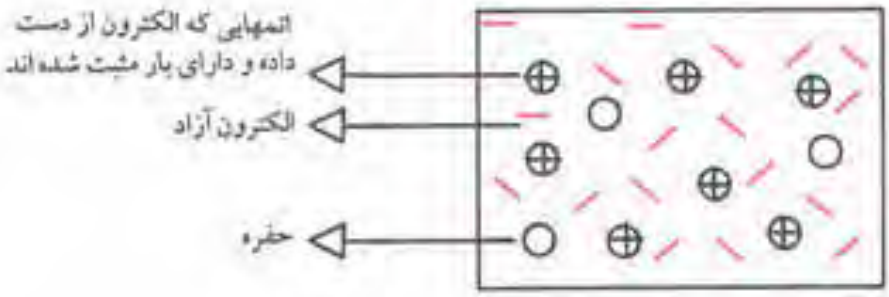
بنابراین ، هر اتم آرسنیک ، یک الکترون اضافی تولید می‌کند ، بدون اینکه حفره‌ای ایجاد شده باشد . لذا می‌توان با تنظیم مقدار ناخالصی ، تعداد الکترونهای آزاد را کنترل نمود . در این نیمه‌هادی ناخالص شده ، تعداد الکترونهای آزاد به مراتب بیشتر از حفره‌ها می‌باشند و حفره‌ها فقط بر اثر شکستن پیوندها به وجود می‌آیند .

نیمه‌هادیهایی که ناخالصی آن از اتمهای پنج ظرفیّتی باشد ، نیمه‌هادی نوع N[2] نام دارد . علامت N به دلیل وجود بار منفی ناشی از وجود الکترونهای آزاد ، قرار داده شده است .

۱ـ Impurity

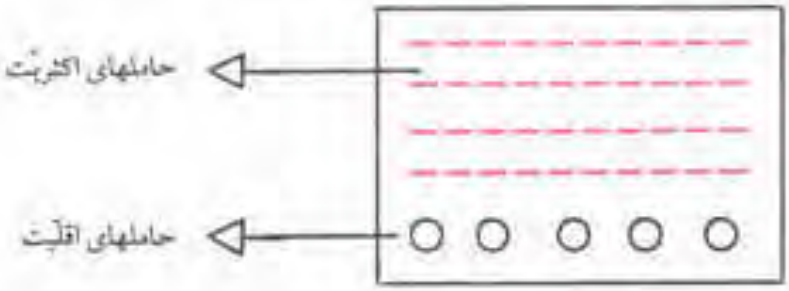
۲ـ Negative

به طورخلاصه وساده ، نیمه هادی نوع N را می‌توان مانند شکل (۱۲ ـ ۲) نشان داد .



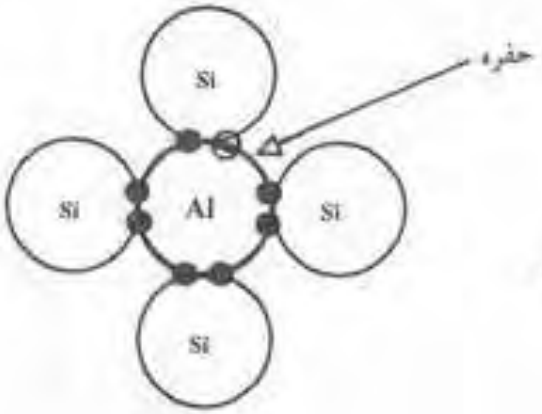
شکل (۱۲ـ۲) نیمه هادی نوع N

در این نیمه هادی (نوع N) ، چون تعداد الکترونها خیلی بیشتر از تعداد حفره‌هاست و عمل هدایت جریان را نیز انجام می دهند به آنها حاملهای اکثریت و به حفره‌ها ، حاملهای اقلیّت می گویند . شکل (۱۳ ـ ۲) . یادآوری می شود که تعداد حاملهای اکثریّت ، حدود یک میلیون برابر تعداد حاملهای اقلیّت می باشد .



شکل (۱۳ـ۲) مقایسه حاملهای اکثریّت (الکترونها) در مقابل حاملهای اقلیّت (حفره‌ها)

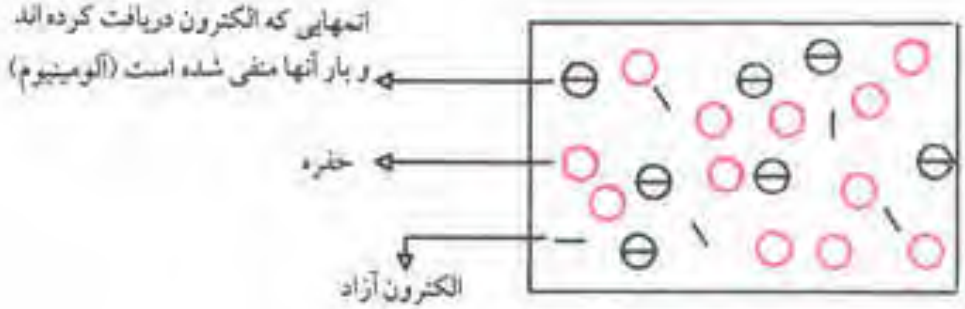
۲ ـ ۸ ـ ۲ ـ ناخالص کردن کریستال نیمه هادی با اتم سه ظرفیتی : اگر یک عنصر سه ظرفیّتی ، مانند آلومینیوم و یا گالیم را به سیلیسیم و یا ژرمانیم خالص اضافه نماییم ، سه الکترون مدار آخر آلومینیوم با سه الکترون سه اتم سیلیسیم و یا ژرمانیم مجاور ، تشکیل پیوند اشتراکی می دهند و پیوند چهارم دارای کمبود الکترون است و یا می توان گفت که یک حفره ایجاد شده است . شکل (۱۴ ـ ۲)



شکل (۱۴ـ۲) ناخالص کردن با اتم ۳ ظرفیتی

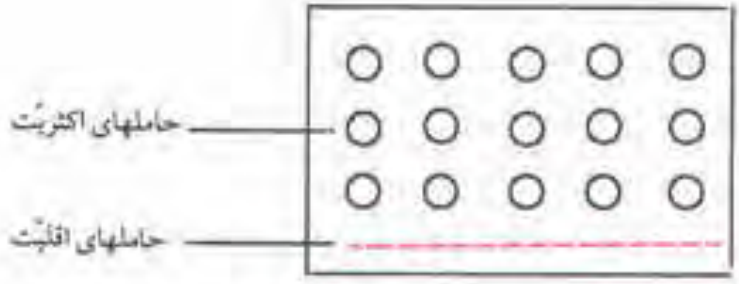
هر اتم سه ظرفیّتی ، باعث ایجاد یک حفره می شود؛ بدون اینکه الکترون آزاد ایجاد شده باشد . در این نیمه هادی ناخالص شده ، الکترونها فقط در اثر شکسته شدن پیوندها به وجود می آیند . تعداد حفره های ایجاد شده توسّط ناخالصی سه ظرفیّتی را می توان با تغییر در صد ترکیب به هر مقدار که بخواهیم ، به وجود آوریم .

نیمه هادیهایی که ناخالصی آنها از اتمهای سه ظرفیّتی باشد ، نوع P[1] نام دارد ، علامت P به دلیل وجود بارهای مثبت حفره ها می باشد . به طور ساده و خلاصه می توان نیمه هادی نوع P را طبق شکل (۱۵ـ۲) نشان داد .



شکل (۱۵ـ۲) نیمه هادی نوع P

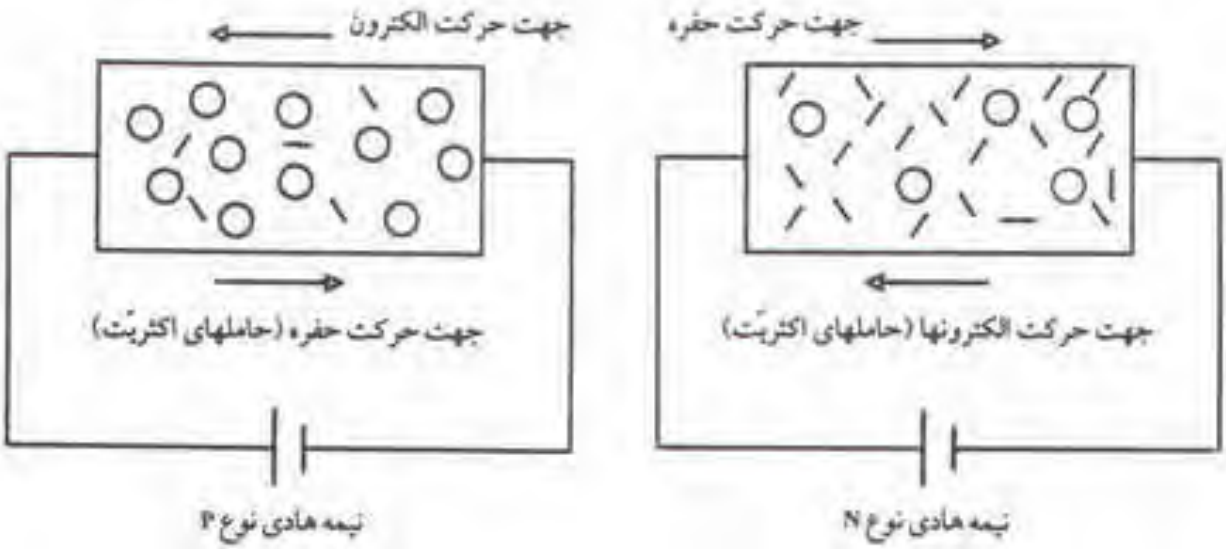
حفره ها در این نیمه هادی به عنوان حاملهای اکثریت و الکترونها به عنوان حاملهای اقلّیت می باشند . شکل (۱۶ـ۲)



شکل (۱۶ـ۲) مقایسه حاملهای اکثریّت (حفره ها) در مقابل حاملهای اقلّیّت (الکترونها)

جهت حرکت حاملهای اکثریّت و اقلّیت در نیمه هادی نوع N و P طبق شکل (۱۷ـ۲) می باشد .

۱ـ Positive



شکل (۱۷ـ۲)

لازم به یاد آوری است که مقدار ناخالصی بسیار کم می باشد و در حدود تقریبی یک اتم ناخالصی در مقابل 10^{7} اتم ژرمانیم و یا سیلیسیم می باشد . باز هم به طور تقریب می توان گفت که این مقدار ناخالصی ، مقاومت نیمه هادی را حدود ۱۶ برابر کم می کند . اگر به 10^{7} اتم ژرمانیم و یا سیلیسیم تعداد دو اتم ناخالصی اضافه گردد ، مقاومت نیمه هادی حدود ۱۶۰ برابر کمتر می شود .

در حال حاضر در کلیه موارد ، به جز چند مورد خاص (مثلاً در دیودهای آشکارساز) ، از نیمه هادی سیلیسیم استفاده می شود . زیرا :

۱ ـ سیلیسیم به مقدار زیاد و به صورت سیلیس (SiO_2) در طبیعت یافت می شود .

۲ ـ خالص کردن سیلیسیم به مراتب ساده تر از ژرمانیم می باشد .

۳ ـ تکنولوژی ساخت دیود ، ترانزیستور و مدارات مجتمع (IC) با سیلیسیم ساده تر است .

۴ ـ تحمّل درجهٔ حرارت سیلیسیم بیشتر است .

۵ ـ باند ممنوعه سیلیسیم پهن تر و جریان اشباع معکوس سیلیسیم کمتر است در نتیجه درجه ذوب آن بالاتر است .

۶ ـ چگالی جریان Si از Ge بیشتر است . (معمولاً برای Si $\frac{200A}{mm^2}$ و برای Ge $\frac{150A}{mm^2}$)

از این رو ، امروزه تقریباً بیش از ۹۰ درصد قطعات نیمه هادی ، از سیلیسیم ساخته می شود.

پرسش

۱ ـ مقاومت مخصوص را تعریف کنید .

۲ ـ باندهای انرژی ژرمانیم و سیلیسیم را توضیح دهید .

۳ ـ ساختمان اتمی ژرمانیم و سیلیسیم را تشریح کنید .

۴ ـ ساختمان کریستالی ژرمانیم و چگونگی اتّصال اتمها را تشریح کنید .

۵ ـ الکترون آزاد را تعریف کنید .

۶ ـ تئوری حفره‌ها را توضیح دهید .

۷ ـ چگونگی حرکت حفره و الکترون را مقایسه کنید .

۸ ـ چگونگی تشکیل نیمه‌هادی نوع P را شرح دهید .

۹ ـ چگونگی تشکیل نیمه‌هادی نوع N را شرح دهید .

۱۰ ـ مزیّت استفادهٔ نیمه‌هادی سیلیسیم نسبت به ژرمانیم را در صنعت نام ببرید .

فصل سوم

دیود

هدفهای رفتاری : فراگیر در پایان این فصل خواهد توانست :

۱ـ اتّصال PNرا توضیح دهد.

۲ ـ خصوصیّات اتّصال PN را توضیح دهد.

۳ ـ به سؤالات مربوط به اتّصال PN پاسخ دهد.

۴ ـ سمبل و منحنی مشخّصه دیود را توضیح دهد.

۵ ـ مشخّصات دیود را بیان کند.

۶ ـ با استفاده از منحنی مشخّصه ، دیود را انتخاب کند.

۷ـ انواع دیودهای متداول را نام ببرد.

۸ ـ منحنی مشخّصه دیودها را توضیح دهد.

۹ ـ فرق بین دیود زنر با سایر دیودها را توضیح دهد.

۱۰ـ اصول کار دیود زنر و فتودیود را توضیح دهد.

۱۱ ـ دیود و راکتور را شرح دهد.

۱۲ ـ فرق بین دیود و راکتور با سایر دیودها را توضیح دهد.

۱۳ ـ اصول کار دیود نوری (LED) را شرح دهد.

۱۴ ـ موارد کاربرد LED را بیان کند.

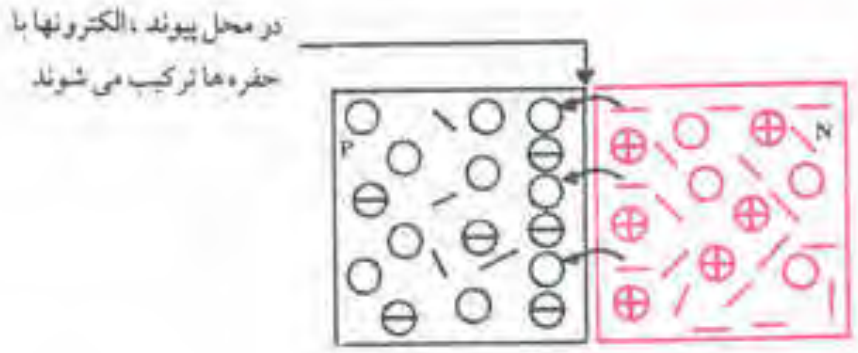
۱ـ۳ ـ اتّصال PN[1]

تاکنون خصوصیّت الکتریکی نیمه هادی نوع P و N را ، به طور جداگانه مورد بررسی قرار داده ایم . حال می خواهیم بدانیم اگر این دو نیمه هادی را به یکدیگر پیوند دهیم ، چه اتفاقی می افتد؟

برای پاسخ دادن به این سؤال ، به شکل (۱ ـ ۳) توجه کنید :

---

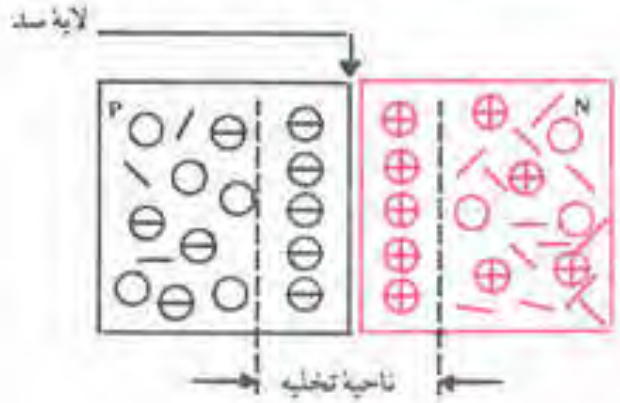
۱ ـ PN Junction



شکل (۱ـ۳) پیوند PN

لحظه ای کـه دو قطعهٔ نیمـه هادی نوع P وNرا به هم پیوند می دهـیم ، از آنجاییکه الکترونهـا و حفره ها قابـل انتقالند، الکترونـهای موجود در نیـمه هادی نوع N به خاطر بار الکتریکی مثبت حفره ها ، جذب حـفره ها می گردند. لذا در **محلّ اتّصال** نیمه هادی نوع NوP ، نه الکترون آزاد وجـود دارد و نه حفره . به این مـحل که در آن الکترونها و حـفره ها وجود ندارند ،ناحیه تخلیه[1] می گویند.

عرض ناحیهٔ تخلیه ، بسیـار کم می باشد (گاهی حدود چند دهم میکرون) . انتهای محل پیوند PN هیچ گونه الکترون اضافه و یا کـم ندارند. (مدار آخر آنها کامل است) لذا ، می توان این محل را به عنوان یک عایق به حساب آورد. شکل (۲ـ ۳)



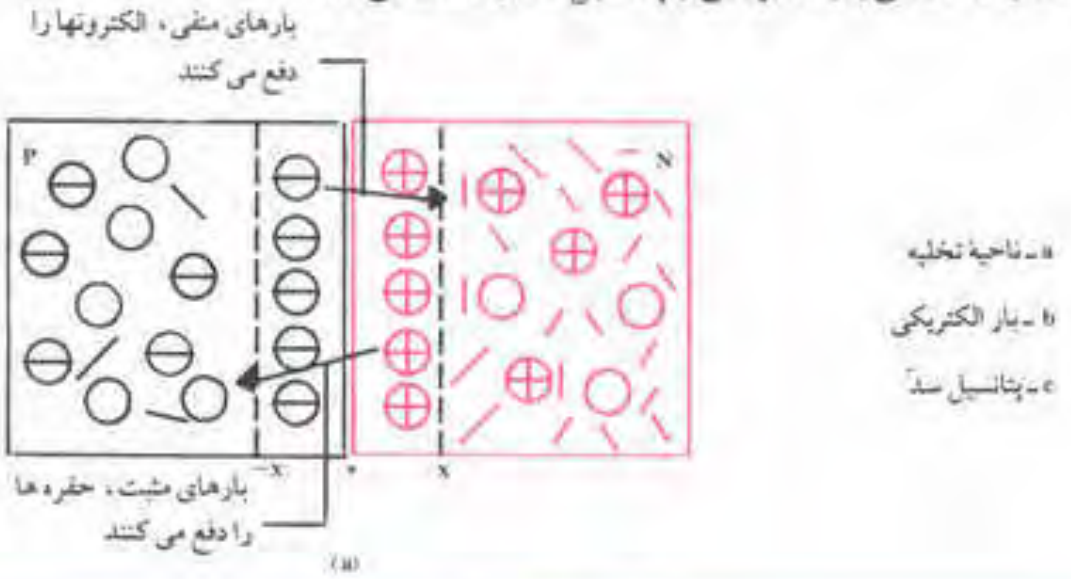
شکل (۲ـ۳) لایه سد

همانطور که در شکل (۲ـ ۳) مشاهده می شود، ناحیه تخلیه ، فاقد الکترون آزاد و حفـره می باشد. امّـا در این ناحیـه ، انتهایی کـه الکترون از دسـت داده و یا گرفتـه اند، از آنجاییکه این انتهـا نمی توانند حرکت کنند، به صـورت بارهای مثبت و منفی درنیـمه هادی

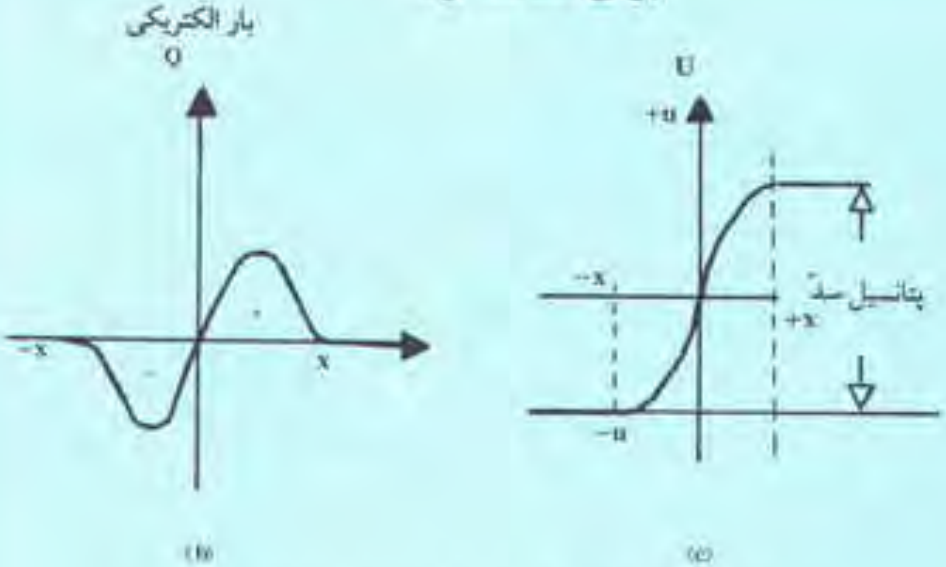
۱ـ Deplition Region

نوع N و P باقی می مانند. در بقیه دو نیمه هادی نوع N و P (به جز ناحیه تخلیه) وضع عادی خود را که قبلاً توضیح داده شد، دارند.

در ناحیهٔ تخلیه، بارهای مثبت در نیمه هادی نوع N و بارهای منفی در نیمه هادی نوع P، در دو طرف لایهٔ سد یا لایهٔ عایق قرار گرفته اند. مجموعهٔ ناحیه تخلیه، مانند یک خازن می باشد (دو نیمه هادی به عنوان دو جوشن و لایه سد به عنوان عایق دی الکتریک) که شارژ شده است. بنابراین، بارهای مثبت و منفی تشکیل یک پتانسیل را می دهند. این پتانسیل، پتانسیل سد نام دارد؛ زیرا این پتانسیل قادر خواهد بود که از عبور بیشتر الکترونها و حفره ها از لایهٔ سد جلوگیری کند. در چنین حالتی، بارهای مثبت در نیمه هادی نوع N، حفره های موجود در نیمه هادی نوع P را و بارهای الکتریکی منفی در نیمه هادی نوع P، الکترونهای نیمه هادی نوع N را، در اطراف لایهٔ سد دفع می کنند. شکل (۳ـ۳) ناحیهٔ تخلیه، منحنی بار الکتریکی و پتانسیل سد را نشان می دهد.



برای مطالعه آزاد



شکل (۳ـ۳) نمایش بار الکتریکی و پتانسیل سد در ناحیه تخلیه

مقدار پتانسیل سد برای دیودهای سیلیسیمی حدود ۰/۶ ولت و برای دیودهای ژرمانیمی حدود ۰/۲ ولت می باشد. لازم به تذکر است که ما نمی توانیم به طور مستقیم (مثلاً با ولت متر) این پتانسیل را اندازه بگیریم. زیرا این پتانسیل، فقط در ناحیه تخلیه به وجود می آید نه در دوانتهای نیمه هادی P و N که بتوانیم مثلاً با ولت متر اندازه بگیریم. اندازه گیری این ولتاژ را فقط می توان با وصل ولتاژ خارجی که در قسمت (۴ـ۳) توضیح داده خواهد شد، به دست آورد.

پتانسیل سد، یک میدان الکتریکی از نیمه هادی نوع N به طرف نوع P به‌وجود می‌آورد، که در شکل (۴ـ۳) با حرف E نشان داده شده و جهت میدان نیز با فلش مشخص گردیده است.

مطالب زیر را به خاطر بسپارید.

۱ـ بعد از پیوند نیمه هادی نوع P و N کنار یکدیگر، الکترونهای آزاد و حفره ها از محل پیوند عبور کرده، با هم ترکیب می شوند و تشکیل یک لایهٔ سد یا لایهٔ عایق می دهند.

۲ـ یک منطقهٔ تخلیه در محل پیوند ایجاد می گردد که فاقد الکترونهای آزاد و حفره ها می باشد؛ لکن اتمهایی که الکترون از دست داده و یا گرفته‌اند، در دو طرف لایه سد و درمنطقه تخلیه وجود دارند.

۳ـ اتمهای یونیزه شده، ایجاد سد پتانسیل می کنند که برای نیمه هادیهای سیلیسیمی حدود ۰/۶ ولت و برای نیمه هادیهای ژرمانیمی حدود ۰/۲ ولت می باشد.

۴ـ سد پتانسیل باعث می شود که از حرکت و ترکیب بیشتر الکترونها و حفره ها در لایه سد جلوگیری به عمل آید.

۵ـ کریستال نیمه هادی نوع P دارای بارالکتریکی مثبت و کریستال نیمه هادی نوع N دارای بار الکتریکی منفی می باشد.

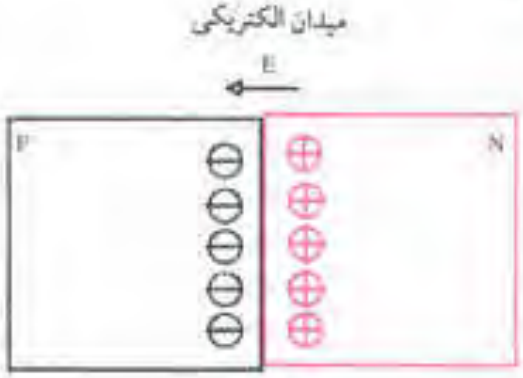
۶ـ به اتّصال PN «دیود» گفته می شود.

۲ـ۳ـ بایاس مستقیم[۱] و معکوس[۲] دیود[۳]

وصل کردن ولتاژ به دیود را بایاس کردن دیود می نامند. اتّصال ولتاژ به دیود به دو

۱ـ Forward Bias ۲ـ Reverse Bias ۳ـ Diode

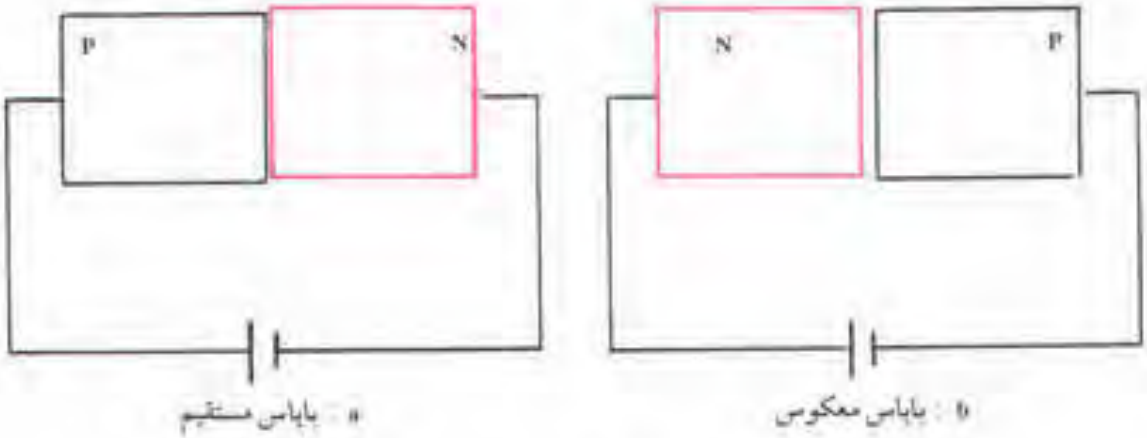
صورت امکان پذیر است.



شکل (۲ـ۳) میدان الکتریکی و جهت آن

۱ـ۲ـ۳ـ نیمه هادی نوع P را به قطب مثبت باتری و نیمه هادی نوع N را به قطب منفی آن متّصل می کنیم. این حالت را بایاس مستقیم می گویند.

۲ـ۲ـ۳ـ نیمه هادی نوع P را به قطب منفی باتری و نیمه هادی نوع N را به قطب مثبت آن وصل می نماییم. این حالت را بایاس معکوس می نامند. شکل (۵ـ۳)

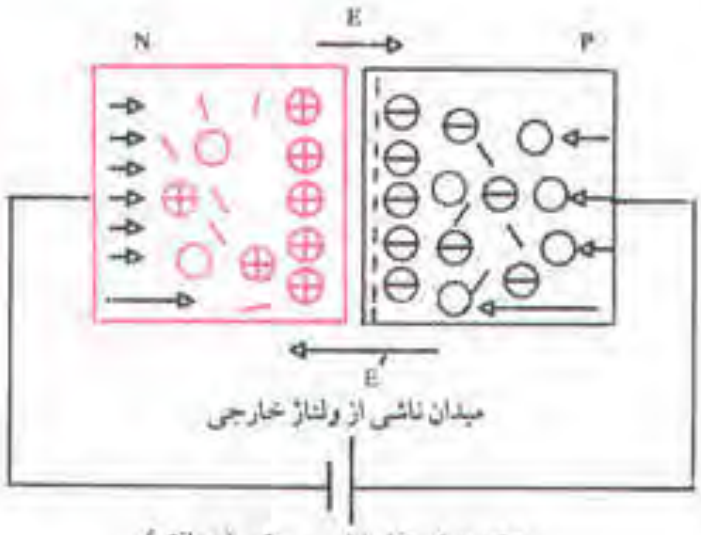


شکل (۵ـ۳) بایاس بندی دیود

هر یک از بایاسها را به طور جداگانه مورد بررسی قرار می دهیم:

بایاس مستقیم(بایاس موافق ـ گرایش مستقیم): شکل (۶ـ۳) اتّصال یک دیود (PN) را به ولتاژ باتری نشان می دهد:

اگر در این بایاس، ولتاژ باتری بیشتر از پتانسیل سد باشد، میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ باتری (E)، میدان الکتریکی پتانسیل سد دیود (E) را خنثی می کند (زیرا جهت میدان باتری، عکس میدان پتانسیل سد است). لذا منطقه تخلیه و پتانسیل سد از بین می رود (لایهٔ سد، در اثر میدان الکتریکی ولتاژ باتری می شکند). الکترونهای آزاد واقع در



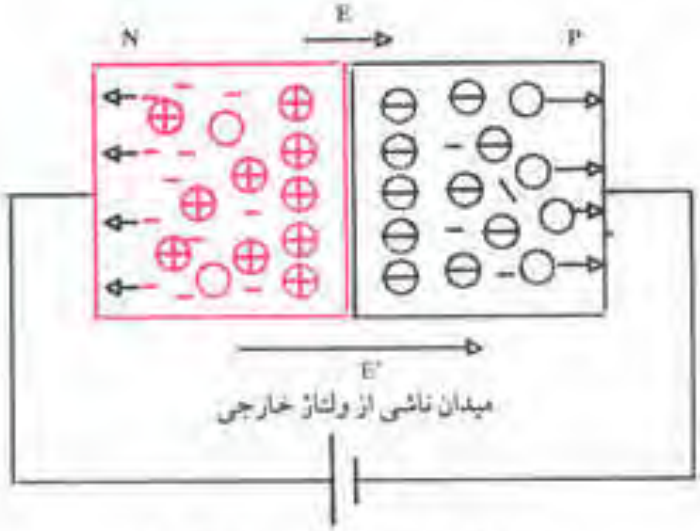
شکل (۶ـ۳) بایاس مستقیم (موافق)

نیمه هادی نوع N ، توسّط بارالکتریکی منفی باتری ، به سمت محل پیوند رانده شده ، از محل پیوند عبور می کنند و بعد از عبور از نیمه هادی نوع P ، جذب پتانسیل مثبت باتری می گردند. در همین حال، حفره ها نیز توسّط ولتاژ مثبت باتری به سمت محل پیوند رانده شده ، وارد نیمه هادی نوع N می گردند و جذب قطب منفی باتری می شوند. بدین ترتیب، الکترونها از قطب منفی خارج شده ، وارد قطب مثبت می گردند . یعنی در مدار، جریان برقرار می شود. این نکته را باید بدانیم که ، وقتی الکترونها از محل پیوند عبور کرده ، وارد نیمه هادی نوع P می گردند مرتباً با حفره ها ترکیب می شوند. پیوند های تشکیل شده ، به خاطر میدان خارجی مرتباً شکسته شده ، الکترون آزاد می گردد و با حفره مجاور ترکیب می شود به این ترتیب با ترکیبهای زیاد و شکسته شدنهای مجدد پیوندها ، الکترونها از نیمه هادی نوع P عبور کرده ، جذب قطب مثبت باتری می گردد. بنابراین الکترونها از طریق حفره ها به قطب مثبت می رسند. لذا ، مثل این است که حفره ها نیز عکس جهت حرکت الکترونها ، حرکت کرده ، جذب قطب منفی می شوند .

اگر نیمه هادی نوع P به قطب مثبت باتری و نیمه هادی نوع N به قطب منفی آن وصل شود و ولتاژ باتری از پتانسیل سد دیود بیشتر باشد، در مدار جریان برقرار خواهد شد.

بایاس معکوس : شکل (۷ـ ۳) اتّصال بایاس معکوس یک دیود را نشان می دهد:

الکترونهای آزاد واقع در نیمه هادی نوع N ، به خاطر پتانسیل مثبت باتری ، به سمت چپ و حفره ها نیز به دلیل پتانسیل منفی باتری ، به سمت راست کشیده می شوند. در این حالت ، عرض ناحیهٔ تخلیه زیادتر می گردد و ولتاژ باتری ، پتانسیل سد را تشدید می کند؛ لذا، به خاطر افزایش پتانسیل سد و تهی تر شدن ناحیهٔ تخلیه از الکترونها و حفره ها ، جریانی در مدار برقرار نخواهد شد.



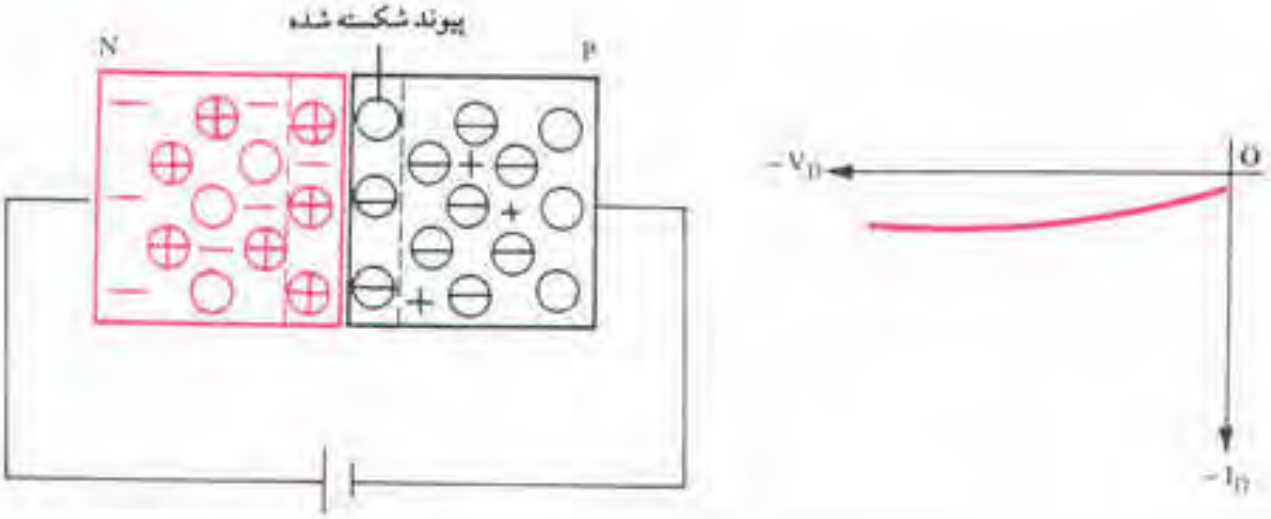
شکل (۷ـ۳) بایاس معکوس (مخالف)

اگر قطب مثبت باتری به نیمه هادی نوع N و قطب منفی باتری به نیمه هادی نوع P وصل شود، جریانی در مدار نخواهیم داشت . به عبارت دیگر ، در بایاس معکوس جریانی در مدار برقرار نمی شود.

۳ـ۳ـ جریان اشباع معکوس در دیود

البته باید به خاطر داشته باشیم که بر اثر گرما ، همواره پیوندها در حال شکسته شدن و ترکیب مجدد هستند. حال اگر دیودی در بایاس معکوس بسته شود و تعدادی از پیوندها در لایه سد شکسته شوند، چه اتفاقی خواهد افتاد ؟

با توجّه به شکل (۸ـ۳) ، 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 خواهد شد و جذب قطب مثبت باتری می گردد. چون لایهٔ سد ، یک الکترون کمبود دارد، یک الکترون از قطب منفی وارد کریستال نوع P می شود و یا می توانیم بگوییم که حفره ، جذب قطب منفی گردیده است . لذا ، در مدار جریان بسیار ضعیفی به وجود می آید

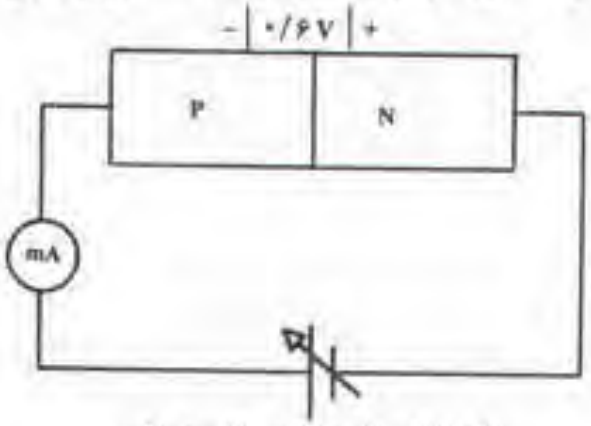


شکل (۸ـ۳) منحنی جریان اشباع معکوس و شکل اتصال پیوند در بایاس معکوس

که به جریان اشباع معکوس معروف است . مقدار این جریان ، بستگی به جنس نیمه هادی و گرمای محیط دارد، زیرا این جریان فقط در اثر شکستن پیوندها ایجاد می شود . در المانهایی که از سیلیسیم ساخته می شوند، این جریان بسیار کم بوده ، گاهی مقدار آن از نانو آمپر تجاوز نمی کند . لذا در بیشتر مواردا ز آن صرف نظر می کنند.

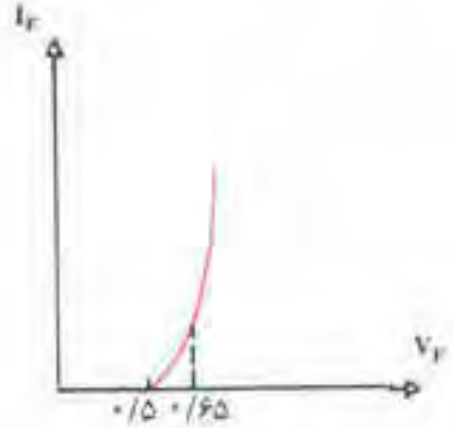
۴ـ۳ـ منحنی مشخّصه ولت ـ آمپر دیود معمولی

اگر یک دیود را ، در بایاس مستقیم اتّصال دهیم و ولتاژ باتری را از صفر ولت به بالا اضافه نماییم و یک میلی آمپر متر نیز با مدار ، مطابق شکل (۹ ـ ۳) ، سری کنیم، متوجّه می شویم که هر گاه ولتاژ صفر است ، جریان نیز صفر می باشد. با افزایش ولتاژ تا حدود ۰/۵ ولت (برای دیودسیلیسیمی) میلی آمپرمتر تقریباً جریانی را نشان نمی دهد. زمانی که ولتاژ از ۰/۵ ولت بیشتر می شود، جریان بسیار ضعیفی در مدار برقرار می گردد. وقتی که ولتاژ



شکل (۹ـ۳) اتصال در بایاس مستقیم

باتری به حدود ۰/۷ ولت می رسد، جریان به طور ناگهانی افزایش می یابد . اگر منحنی تغییرات ولتاژ در بایاس مستقیم را به ازای تغییرات جریان روی محورهای مختصات ترسیم کنیم . مطابق شکل (۱۰ـ۳) یک منحنی به دست می آید که به منحنی مشخّصه ولت ـ آمپر دیود معروف است .



شکل (۱۰ ـ۳) منحنی مشخصه دیود در بایاس مستقیم

دلیل زیاد شدن ناگهانی جریان ، به خاطر غلبه ولتاژ خروجی بر پتانسیل سد می باشد . هنگامی که ولتاژ خارجی ، بیشتر از ولتاژ سد شد ، مقاومت دیود کم شده ، جریان زیاد می شود . اگر این جریان محدود نشود ، باعث سوختن دیود می گردد . حداکثر این جریان را که به ازای آن دیود نمی سوزد ، کارخانجات سازنده مشخص می نمایند .

اگر دیود را در بایاس معکوس اتّصال دهیم و ولتاژ خارجی را زیاد کنیم ، جریان بسیار ضعیفی از مدار خواهد گذشت (جریان اشباع معکوس) . و اگر ولتاژ را باز هم زیاد کنیم ، به مقدار ولتاژی می رسیم که جریان شدیداً و به طور ناگهانی در مدار زیاد می شود و باعث سوختن دیود می گردد . به این ولتاژ ، ولتاژ شکست دیود گفته می شود . ولتاژ شکست دیود (حداکثر ولتاژ معکوس) را کارخانجات سازنده مشخّص می کنند که به عنوان یک مشخّصه در انتخاب دیود به کار می رود . شکل (۱۱ ـ ۳) منحنی مشخّصه ولت ـ آمپر یک دیود را در بایاس مستقیم و معکوس نشان می دهد .

در بسیاری از موارد برای دیودهای معمولی، مشخّصه بایاس معکوس کشیده نمی شود.

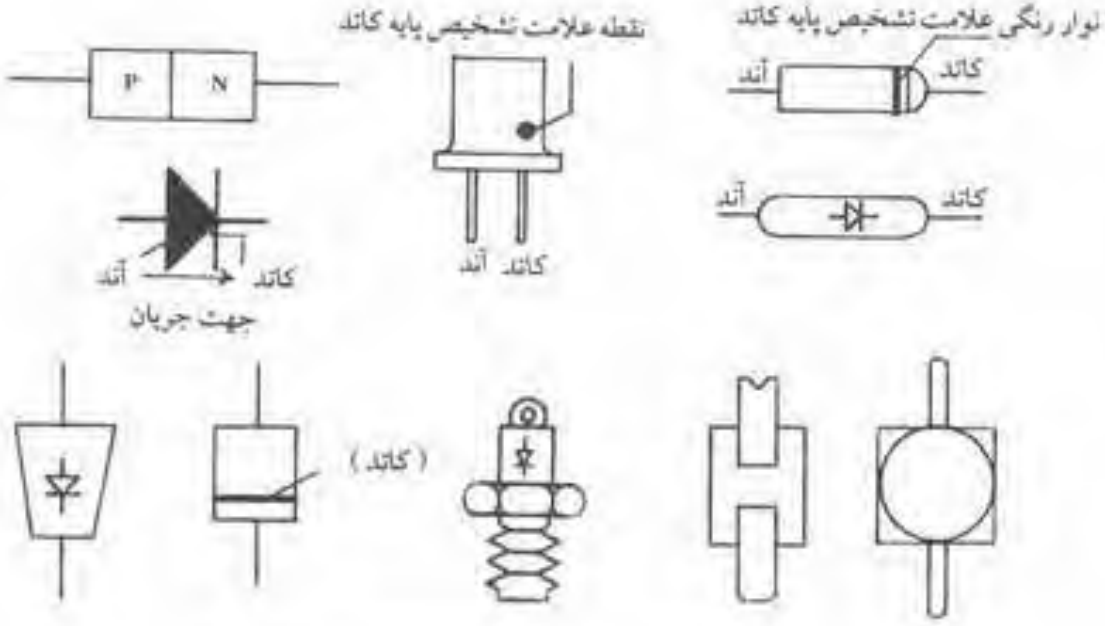
۵ ـ ۳ ـ علامت اختصاری و ساختمان ظاهری دیود معمولی

دیود های معمولی ، از نظر ظاهری به شکلهای مختلفی ساخته می شوند که علامت

شکل (۱۱ـ۳) منحنی مشخصهٔ دیود در بایاس موافق و مخالف

اختصاری همه یکسان است ، ولی از نظر علامت گذاری پایه ها (آند و کاتد) با هم فرق دارند. شکل (۱۲ـ ۳) علایمی را که غالباً برای دیودهای نیمه هادی به کار برده می شوند نشان می دهد .

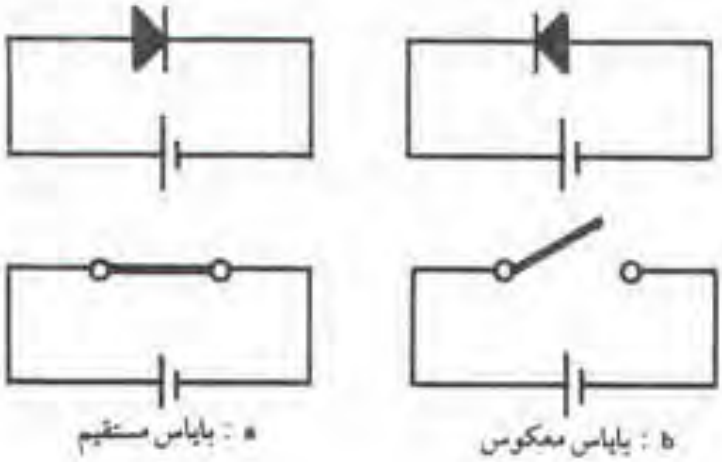
علامت مثلث ، جهت جریان قراردادی را نشان می دهد . نیمه هادی نوع P را آند، و نیمه هادی نوع N را کاتد، نامگذاری می نمایند . شرط هدایت دیود، مثبت تر بودن ولتاژ آند نسبت به کاتد می باشد.



شکل (۱۲ـ۳) شکل ظاهری چند نمونه دیودهای نیمه هادی

۶ـ۳ـ بررسی دیود در حالت ایده آل

یک دیود ایده آل ،مانند کلیدی است که در بایاس مستقیم ، بسته و در بایاس معکوس ، باز است . شکل (۱۳ـ۳)

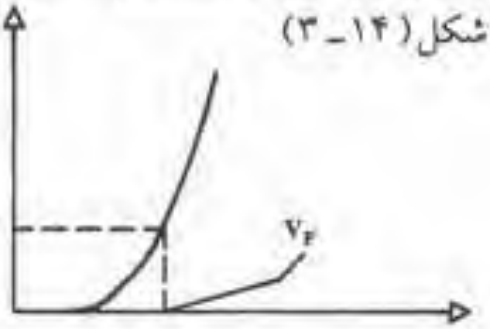


شکل (۱۳ـ۳) نمایش عملکرد دیود در بایاس مستقیم و معکوس

یک چنین دیودی ، در عمل وجود ندارد ؛ ولی می توان حالتهای کلیدی را در تشریح مدارات الکترونیکی به کار برد . هنگامی که از دیود ، جریانی عبور می کند ، در دو سر آن افت ولتاژی حدود ۰/۵ تا ۱/۵ ولت به وجود می آید . مقدار دقیق افت ولتاژ را کارخانجات سازنده دیود ، به ازای یک جریان معین ، مشخص می نمایند .

۷ـ۳ـ مقاومت استاتیکی و دینامیکی دیود معمولی

مقاومت اهمی در یک دیود ، برابر است با افت ولتاژ دو سر آن ، تقسیم بر جریان عبوری از آن . مقاومت دیود در مقابل عبور جریان مستقیم و متناوب فرق می کند . مقاومت دیود در مقابل عبور جریان مستقیم را مقاومت استاتیکی می نامند و از رابطهٔ زیر به دست می آید. شکل (۱۴ـ۳)



شکل (۱۴ـ۳) نمایش مقاومت استاتیکی

$$r_{dc} = \frac{{}^{*}V_F}{{}^{**}I_F}$$

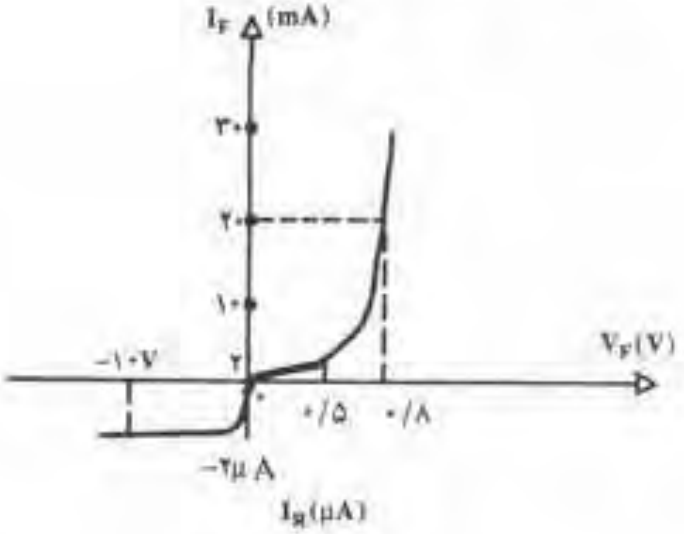
مقدار مقاومت استاتیکی ، به ازای یک جریان مستقیم مشخص ، ثابت می باشد .

---

* V_F = Forward Bias Voltage — ولتاژ بایاس مستقیم

** I_F = Forward Bias Current — جریان بایاس مستقیم

مثال ۱ ــ ۳ : برای مشخّصه های شکل (۱۵ ــ ۳) مقاومت DCرا در جریانهای ۲۰mA، ۲mA و ۲μA− به دست آورید .



شکل (۱۵ــ۳)

حل :

$$I_F = ۲۰mA \xrightarrow{\text{منحنی}} V_F = ۰/۸V$$

$$r_{dc} = \frac{V_F}{I_F} = \frac{۰/۸V}{۲۰mA} = ۴۰\ \Omega$$

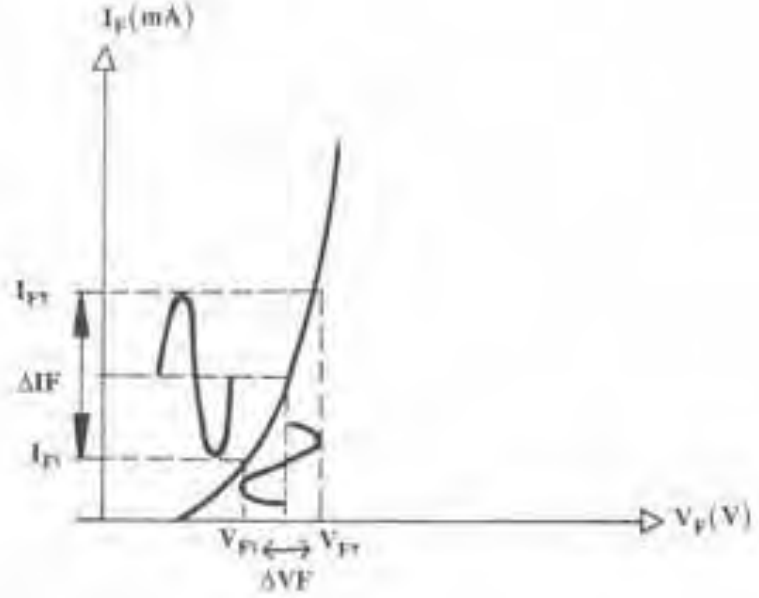
$$I_F = ۲mA \xrightarrow{\text{منحنی}} V_F = ۰/۵V$$

$$r_{dc} = \frac{V_F}{I_F} = \frac{۰/۵V}{۲mA} = ۲۵۰\Omega$$

$$I_F = -۲\mu A \xrightarrow{\text{منحنی}} V_F = -۱۰V$$

$$r_{dc} = \frac{V_F}{I_F} = \frac{-۱۰V}{-۲\mu A} = ۵M\Omega$$

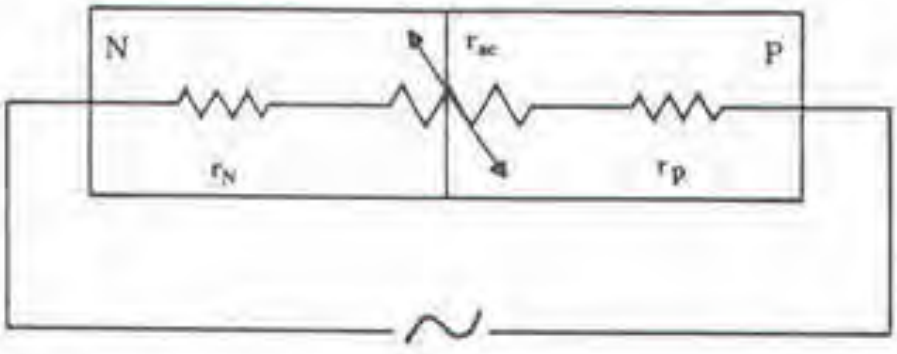
مقاومت دیود در مقابل جریان متناوب را ، مقاومت دینامیکی می نامند و از رابطه صفحه بعد به دست می آید . شکل (۱۶ ــ ۳)



شکل (۱۶ـ۳) نمایش مقاومت دینامیکی

$$r_{ac} = \frac{V_{F_2} - V_{F_1}}{I_{F_2} - I_{F_1}} = \frac{\Delta V_F}{\Delta I_F}$$

مقاومت دینامیکی ، در حقیقت تغییر مقاومت لایهٔ سد می باشد که با افزایش ولتاژ خارجی کمتر می گردد . شکل (۱۷ ـ ۳) ، مقاومت دینامیکی لایهٔ سد و مقاومتهای لایه های P و N را نشان می دهد .



شکل (۱۷ـ۳) نمایش مدار معادل مقاومتی یک اتصال PN

r_N مقاومت اهمی سطح نیمه هادی نوع N که مقدار آن ثابت می باشد (مقدار آن بسیار کم می باشد) .

r_p مقاومت اهمی سطح نیمه هادی نوع P که مقدار آن ثابت می باشد (مقدار آن بسیار کم می باشد) .

r_{ac} مقاومت اهمی لایه سد که مقدار آن تابع ولتاژ بایاس می باشد

مثال ۲ـ ۳ : برای مشخصه های شکل (۱۸ ـ ۳) مطلوبست :

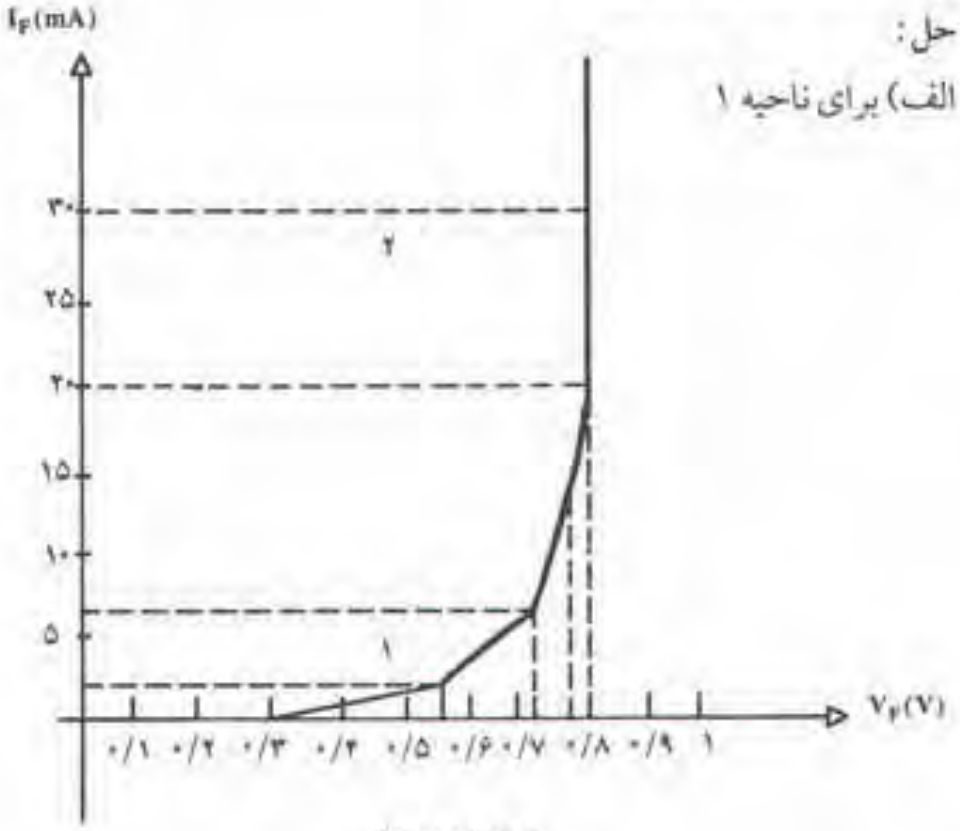
الف ـ مقاومت AC برای ناحیه ۱

ب ـ مقاومت AC برای ناحیه ۲

ج ـ مقایسه مقاومت نواحی ۱ و ۲

حل:

الف) برای ناحیه ۱



شکل (۱۸ـ۳)

$$\Delta V_F = ۰/۷۲ - ۰/۵۷ = ۰/۱۵V$$

$$\Delta I_F = ۶ - ۲ = ۴mA$$

$$r_{ac_۱} = \frac{\Delta V_F}{\Delta I_F} = \frac{۰/۱۵}{۴} = ۳۷/۵\Omega$$

ب) برای ناحیه ۲

$$\Delta V_F = ۰/۸ - ۰/۷۸ = ۰/۰۲V$$

$$\Delta I_F = ۳۰ - ۲۰ = ۱۰\ mA$$

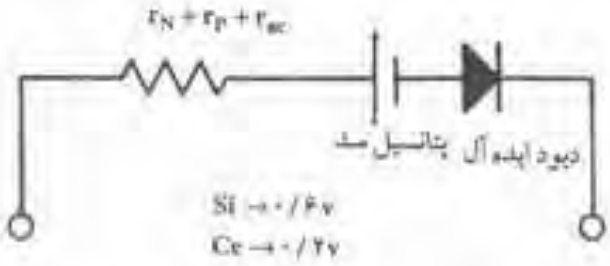
$$r_{ac_۲} = \frac{\Delta V_F}{\Delta I_F} = \frac{۰/۰۲}{۱۰} = ۲\Omega$$

ج) مقایسهٔ مقاومت دینامیکی نواحی ۱ و ۲

$$\text{نسبت مقاومتها} = \frac{۳۷/۵}{۲} = ۱۹$$

۸ـ۳ـ مدار معادل دیود معمولی

همانطور که دیدیم ، یک دیود دارای یک مقاومت اهمی ($r_N - r_P - r_{ac}$) ، و یک پتانسیل سد حدود ۰/۶ ولت برای نیمه هادی ، نوع سیلیسیمی و ۰/۲ ولت برای نیمه هادی نوع ژرمانیمی می باشد . در ضمن ، دیود می تواند فقط در یک جهت ، جریان را عبور دهد . لذا با توجه به مطالب بالا می توان مدار معادل دیود را به صورت شکل (۱۹ـ۳) نشان داد .



شکل (۱۹ـ۳) نمایش مدار معادل دیودی

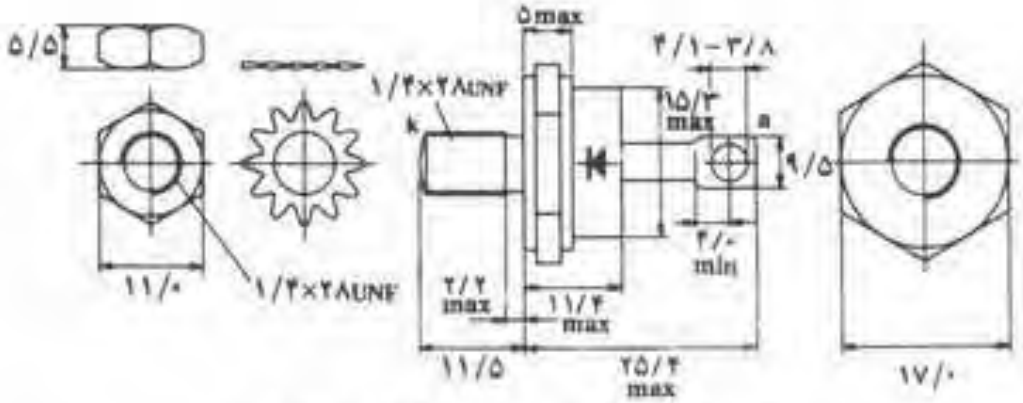
۹ـ۳ـ مقادیر حد در دیودها

به طور کلّی ، هر دیود برای جریان عبوری مستقیم و ولتاژ معکوس مشخّصی ، ساخته می شود که با توجّه به نوع کار مورد نظر ، از نظر جریان عبوری و ولتاژ معکوس ، می توان شمارهٔ دیود دلخواه را با توجّه به جداول مشخّصات الکتریکی دیودها و یا کاتالوگهای مربوطه انتخاب کرد . کارخانه های سازنده ، مشخّصات زیادی از دیودها را در اختیار قرار می دهند که بسته به نوع طرّاحی ، می توان از آنان استفاده نمود . در ذیل ، به تعدادی از مشخّصه های الکتریکی دیودها که بیشتر در طرّاحی یکسو کننده ها به کار می رود ، اشاره می شود :

۱ـ۹ـ۳ـ ماکزیمم ولتاژ معکوس مجاز (V_R) : ماکزیمم ولتاژ معکوس مجاز ، عبارت است از حداکثر ولتاژی که در بایاس معکوس ، دو سر دیود قرار می گیرد . این ولتاژ می تواند جمع ولتاژهای لحظه ای و ثابت و یا ماکزیمم دامنهٔ سیکلهای تکراری باشد . معمولاً کارخانجات سازنده ، حداکثر ولتاژ معکوس مجاز ـ که در دو سر دیود قرار می گیرد ـ برای ولتاژهای ثابت و ولتاژهای متناوب به طور جداگانه در اختیار می گذارند و علامت V_R را برای ولتاژهای ثابت و علامت V_{RM} را برای ولتاژهای متناوب به کار می برند .

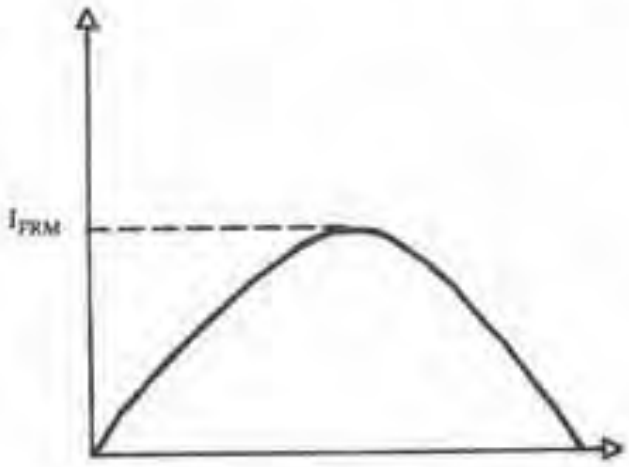
۲ـ۹ـ۳ـ ماکزیمم جریان مستقیم یا متوسّط دیود (I_F) : مقدار ماکزیمم جریان عبوری مستقیم ، عبارت است از مقدار جریان dc یا متوسّط که مُجاز هستیم از دیود عبور

دهیم . درصورتی که بر اثر عبور این جـریان ، حرارت ایجاد شده در اتّصال PN ، در هوای آزاد به خوبی نتواند دفع شود باید دیود را روی گرماگیر[1] نصب نمود. لازم به یادآوری است که اگـر قرار باشـد دیود روی گرماگـیر نصب شـود ، کارخـانه سازنده مشـخص می کند . معمولاً دیودهایی روی گرماگـیر نصب می شوند که بدنه فلزی دارند . بدنهٔ دیود ، گاهی آند دیود و گـاهی کـاتد دیـود می باشـد . شکل (۲۰ـ ۳) یک نمونه از دیود را کـه باید روی گرماگیر نصب شود نشان می دهد .



شکل (۲۰ ـ۳) گرماگیر و نحوه سوارشدن دیود روی آن

۳ـ۹ـ۳ـ ماکـزیمم جریان تکراری (I_{FRM})[2] : ماکزیمم جـریان تکراری ، عبارت است از حـداکـثر دامـنهٔ جریـانی که به صـورت تکرار سـیکلهـا در دیود جـاری می گـردد. شکل(۲۱ـ ۳)

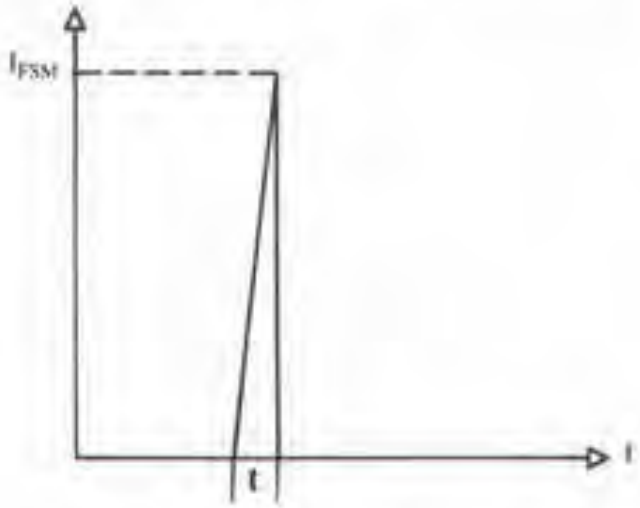


شکل (۲۱ـ۳)دامنهٔ ماکزیمم جریان تکراری

۱ـ Heat sink

۲ـ I_{FRM}= Maximum Repetitive Peak Forward Current

۴ ـ ۹ ـ ۳ ـ ماکزیمم جریان لحظه ای (I_{FSM})[1] : عبارت است از حداکثر جریانی که دیود می تواند در لحظه ای بسیار کوتاه (حدود چند میکرو ثانیه یا میلی ثانیه) تحمّل کند . شکل (۲۲ ـ ۳)



شکل (۲۲ ـ ۳) دامنهٔ ماکزیمم جریان لحظه ای

۱۰ ـ ۳ ـ امتحان کردن دیود با اهم متر

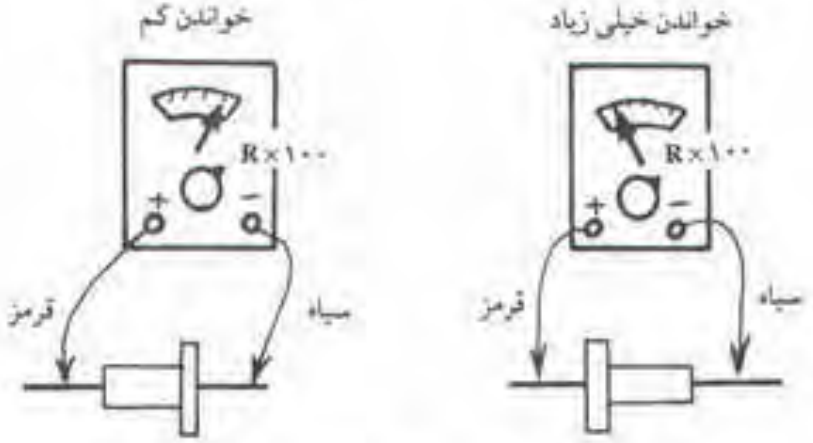
سالم بودن یک دیود را به راحتی می توان با یک اهم متر قطبی [2] مشخّص کرد . بدین صورت که دیود را به ترمینالهای اهم متر قطبی ، وصل می کنیم (سلکتور اهم متر روی $R \times ۱۰۰$ باشد) اگر عقربه حرکت کرد و اهم کمی را نشان داد ، اتّصال دیود را معکوس می کنیم . این بار ، عقربه نباید حرکت کند . یعنی مقاومت بینهایت را نشان دهد و برعکس . پس هدایت دیود از یک جهت و هدایت نکردن آن در جهت دیگر ، دلیل بر سالم بودن آن است . حال ، برای شناسایی پایه های آن حالتی که اهم متر اهم کمی را نشان می دهد در نظر می گیریم . پایه ای که به قطب مثبت اهم متر قطبی وصل شده است آند و پایه دیگر کاتد خواهد بود .

در صورتی که مقاومت دیود از هر دو طرف کم باشد ، مفهومش این است که دو سر دیود از داخل به هم وصل شده است و بر عکس ، اگر مقاومت دیود از هر دو طرف بینهایت باشد دیود از داخل قطع شده است . شکل (۲۳ ـ ۳) طرز آزمایش دیود را نشان می دهد .

---

۱ ـ I_{FSM} = Surge Current (non - Repetitive)

۲ ـ اهم متر قطبی ، اهم متری است که ترمینالهای + و - آن از داخل به ترتیب به قطبهای مثبت و منفی باتری داخلی متّصل باشد . یعنی ، ترمینالهای مشخّص شده روی اهم متر همان قطبهای باتری داخلی باشد . بیشتر اهم مترها قطبی نیستند لذا باید هنگام آزمایش دیود به طور معکوس عمل کرد .



شکل (۲۳ـ۳) نحوهٔ آزمایش سالم بودن دیود

۱۱ ـ ۳ ـ انواع دیود های نیمه هادی

انواع متعدّدی از دیود های با پیوند PN وجود دارند که از لحاظ نوع کار ، مشخّصه و زمینهٔ کار برد با هم متفاوتند. تعدادی از این دیودها ، عبارتند از دیود اتّصال نقطه ای ، دیود زنر ، دیود نوردهنده LED، دیود واراکتور ، دیود تونلی و فتو دیود، که مورد بررسی قرار می گیرند. البتّه دیودهای دیگری نیز وجود دارند که تنها به ذکر نام آنها اکتفا می شود به عنوان نمونه دیود شاتکی ، فتوکاند اکتیو ، دیود منتشر کنندهٔ اشعهٔ مادون قرمز ، دیود کریستال مایع (LCD)سلول خورشیدی ، ترمیستور و . . . را می توان نام برد.

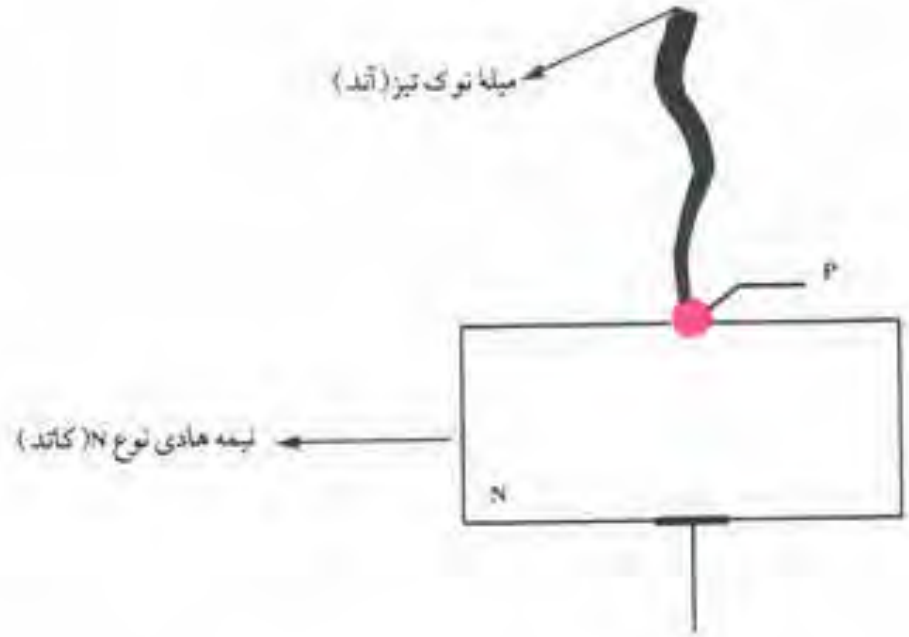
۱۲ ـ ۳ ـ دیود اتّصال نقطه ای[1]

دیودهای معمولی در بایاس معکوس ، ایجاد یک ظرفیّت خازنی (حدود PF) را می نمایند. اگر بخواهیم این دیودها را در فرکانسهای بالا به کار ببریم ، به علت ظرفیّت خازنی در بایاس معکوس ، جریان از مدار عبور می کند. چون 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 ظرفیّت خازن ، ساده ترین راه ، کم کردن سطح اتّصال نیمه هادیها می باشد . لذا دیودهای اتّصال نقطه ای را برای فرکانسهای بالا و جریانهای کم می سازند . شکل (۲۴ ـ ۳) ساختمان ساده یک دیود اتّصال نقطه ای را نشان می دهد .

برای ساختن این دیود ، کریستال نیمه هادی نوع N (معمولاً از جنس ژرمانیم) را انتخاب کرده ، یک سیم نازک مخصوص که خاصیّت فنری داشته باشد به آن می چسبانند و

---

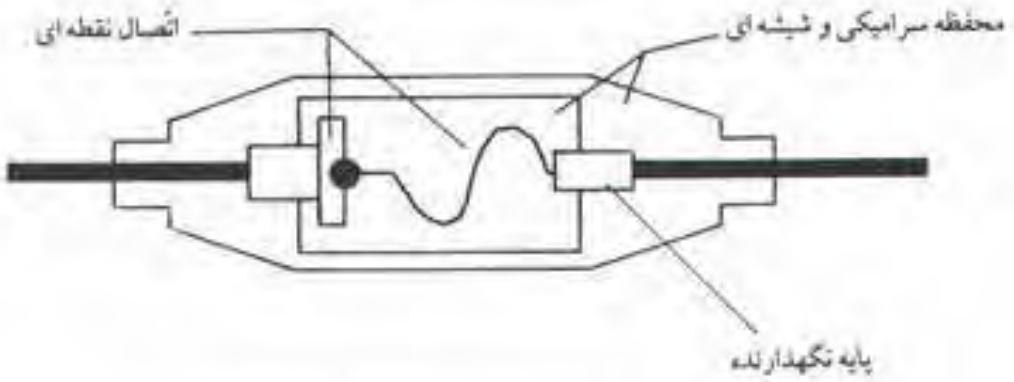
1. Point Contact Diode



شکل (۲۴ـ۳) نمایش ساخت دیود اتصال نقطه ای

سپس یک جریان ضربه ای قوی از آن عبور می دهند . در اثر این عمل اولاً کریستال نوع N ذوب می شود و نوک سیم در داخل آن قرار می گیرد . ثانیاً در اطراف آن یک ناحیه بسیار کوچک P ایجاد می گردد .

علت تبدیل نیمه هادی نوع N به P آن است که در اثر عبوراین جریان از نوک سیم، اتمهای خارجی وارد کریستال گردیده ، آن را تبدیل به P می نمایند . شکل (۲۵ ـ ۳) ساختمان داخلی این دیود را نشان می دهد .



شکل (۲۵ـ۳) نمایش داخلی دیود اتصال نقطه ای

از این دیود برای فرکانسهای زیاد ، در آشکار سازی و مخلوط کنندگیها استفاده می شود .

۱۳ ـ ۳ ـ دیود زنر[1]

۱ ـ ۱۳ ـ ۳ ـ ساختمان دیود زنر : دیود زنر ، مانند دیود معمولی از دو نیمه هادی نوع P و N ساخته می شود . اگر یک دیود معمولی را در بایاس معکوس اتّصال دهیم و ولتاژ معکوس را اضافه نماییم ، در یک ولتاژ خاص ، دیود در بایاس معکوس نیز شروع به هدایت می کند . ولتاژی که دیود در بایاس مخالف ، شروع به هدایت می کند ، به ولتاژ زنر معروف است . این ولتاژ در دیودهای معمولی نسبتاً زیاد است . زنر نام شخصی است که اوّلین بار در سال ۱۹۳۳ این پدیده را کشف کرد .

پدیدهٔ زنر ، ناشی از آن است که در جهت معکوس ، و با ولتاژ زیاد ـ که عملاً در ناحیهٔ تخلیه قرار می گیرد ـ میدان الکتریکی $\vec{E}$ بسیار قوی در این ناحیه به وجود می آید . این میدان قوی ، قادر خواهد بود که پیوندهای سد را بشکند . در نتیجهٔ شکسته شدن سد ، الکترون آزاد و حفره ایجاد می گردد . الکترون آزاد ، بر اثر این میدان قوی ، سرعت گرفته ، می تواند با برخورد به اتمهای دیگر ، الکترونهای دیگری را نیز آزاد کند . بدین طریق ، دراثر این پدیدهٔ زنجیری تعداد زیادی از پیوندها شکسته شده ، در دیود جریان جاری می گردد (شبیه جریان اشباع معکوس ، با این تفاوت که تعداد پیوندهای شکسته شده ، بر اثر گرما نبوده بلکه به خاطر میدان قوی که در دو سر آن قرار گرفته است می باشد) این پدیده را شکست بهمنی می نامند .

در دیودهای زنر ، با تنظیم ناخالصی ، می توان شکسته شدن پیوندها را با میدانهای مختلف (در نتیجه ولتاژهای مختلف) کنترل کرد . لذا می توان با این روش ، دیودهایی ساخت که به ازای یک ولتاژ معیّن در بایاس معکوس در مدار جریان برقرار گردد .

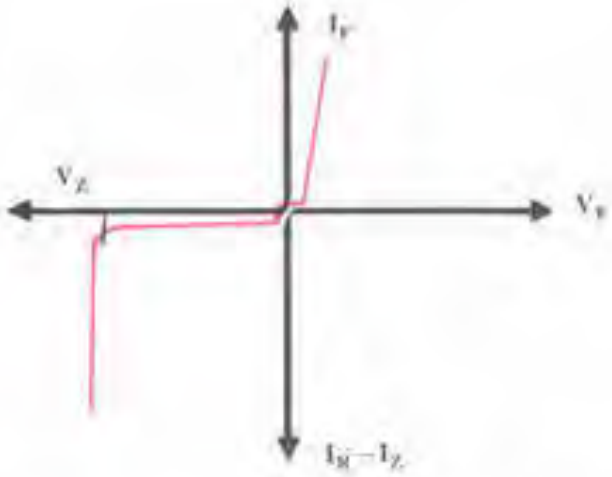
ولتاژی که دیود زنر به‌ازای آن در بایاس معکوس ، هادی می شود به **ولتاژ زنر** معروف است .

جنس نیمه هادی به کار برده شده در دیود زنر ، سیلیسیم است . این دیود در بایاس مستقیم ، مانند یک دیود معمولی عمل می کند . شکل (۲۶ ـ ۳) منحنی مشخّصه ولت ـ آمپر یک دیود زنر را نشان می دهد .

دیود زنر ، در بایاس معکوس استفاده می شود و با توجّه به اینکه ولتاژ زنر تقریباً در جریانهای مختلف معکوس ثابت می باشد ، از این خاصیّت جالب زنر ، برای تثبیت ولتاژ می توان استفاده نمود . نمای مداری دیود زنر را در مدارات الکترونیکی مطابق شکل (۲۷ ـ ۳) نشان می دهند .

---

۱ ـ Zener Diode



شکل (۲۶ـ۳) منحنی مشخصه ولت آمپر دیود زنر

شکل (۲۷ـ۳) نمای مداری دیود زنر

۲ـ۱۳ـ۳ـ استاندارد ولتاژهای زنر : ولتاژ دیودهای زنر را معمولاً به دو استاندارد E۱۲ و E۲۴ می سازند که سری E۲۴ رایجتر است . معمولاً ساخت ولتاژ زنر از ۲/۴ ولت ، شروع شده ، تا ولتاژ ۲۰۰ ولت ادامه می یابد . مقدار ولتاژ زنر سریهای فوق ، مانند مقاومتها می باشد . سری E۱۲ را با تلرانس ۱۰ درصد و سری E۲۴ را با تلرانس ۵ درصد می سازند . معمولاً مقدار تلرانس را روی خود دیود زنر می نویسند . برای تلرانس ۵ درصد از حرف C و برای تلرانس ۱۰ درصد از حرف D استفاده می کنند . مثلاً ولتاژ دیود زنر BZX ۳۲/C۳V۹ ، ۳/۹ ولت بوده ، تلرانس آن ۵(C) درصد می باشد . علامت V به جای ممیز به کار می رود .

۳ـ۱۳ـ۳ـ ضریب حرارتی دیود زنر : مقدار ولتاژ دیود زنر در اثر گرما تغییر می کند . کارخانجات سازنده برای هر دیود زنر ضریبی را می دهند که به ازای تغییر یک درجه حرارت ، ولتاژ زنر تغییر می کند . این ضریب را ضریب حرارتی دیود زنر می نامند . ضریب حرارتی دیود زنر ، با ولتاژ ۵/۱ و ۵/۶ ولت تقریباً صفر است و برای ولتاژهای کمتر از این مقدار ضریب حرارتی منفی و بیشتر از این مقدار ، مثبت می باشد . ضریب حرارتی از رابطهٔ زیر به دست می آید :

$$T_C = \frac{\Delta V_Z}{V_Z . \Delta T} \times ۱۰۰٪ \left[\frac{٪}{°C}\right]$$

۴ـ۱۳ـ۳ـتوان زنر : جریانی که در بایاس معکوس ، از دیود زنر عبور می کند اگر زیاد شود باعث سوختن دیود می گردد . زیرا این جریان باعث به وجودآمدن حرارت ، در محل اتّصال PN می باشد . مقدار جریان ماکزیممی که به ازای آن ، دیود معیوب نمی شود ، بستگی به توان دیود زنر و ولتاژ شکست زنر دارد . لذا ، توان زنر طبق قانون اهم ، از رابطهٔ زیر به دست می آید :

$$P_Z = V_Z . I_Z$$

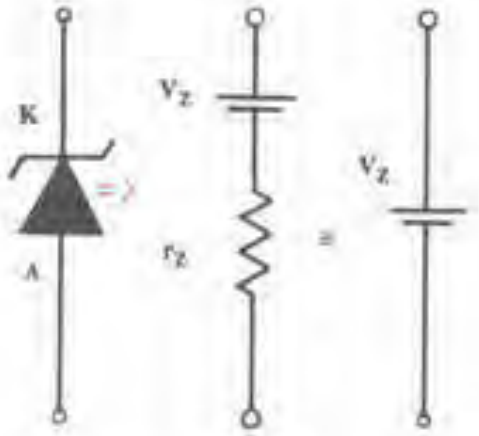
هر دیود زنر ، برای توان خاصّی ساخته می شود که این توانها معمولاً ۰/۱۵W ـ ۰/۲۵W ـ ۰/۳W ـ ۰/۴W ـ ۰/۵W ـ ۰/۷۵W ـ ۱W ـ ۱/۳W ـ ۲W ـ ۳W ـ ۵W ـ ۱۰W ، . . . و ۵۰ W می باشد . بنابراین ، با مشخّص بودن توان زنر و ولتاژ زنر ، می توان حداکثر جریان را از رابطهٔ زیر به دست آورد :

$$I_{ZMax} = \frac{P_Z}{V_Z}$$

۵ـ۱۳ـ۳ـمدار معادل دیود زنر : همانطور که گفته شد ، دیودزنر دربایاس معکوس به کار می رود ، لذا مدار معادل کامل آن ، شامل یک مقاومت کوچک دینامیکی (r_Z) ویک ولتاژ dc مساوی با ولتاژ زنر (V_Z) می باشد . مقدار r_Z از رابطهٔ زیر بدست می آید :

$$r_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z}$$

با فرض اینکه ، کلیّه مقاومتهای خارجی متّصل به دیود ، نسبت به r_Z بزرگ هستند از مقاومت معادل زنر (r_Z)* صرفنظر می شود . شکل (۲۸ـ۳) مدار معادل کامل دیود زنر و بدون r_Z را نشان می دهد .

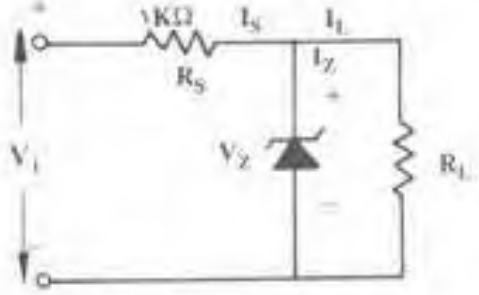


شکل (۲۸ـ۳) مدار معادل کامل وتقریبی دیود زنر

۶ـ۱۳ـ۳ـکاربرد های دیود زنر : عادّی ترین کاربرد دیود زنر ، استفاده از آن در تولید یک ولتاژ مبنای ثابت برای مقایسه و تغذیه می باشد . ساده ترین مداری که می تواند یک

* در بعضی از مدارات مقاومت r_Z در محاسبات منظور می گردد .

ولتاژ نسبتاً ثابتی بدهد، در شکل (۲۹ـ ۳) نشان داده شده است . در این مدار به ازای تغییرات بار (R_L) یا تغییرات ولتاژ ورودی (V_i) در محدوده معیّنی ، می توان خروجی ثابتی دریافت کرد. حالتهای فوق به طور جداگانه ، بررسی شده است .



شکل (۲۹ـ۳) تثبیت کننده زنری

برای مطالعه آزاد

۱ ـ حالتی که V_i ثابت و R_L متغیّر است.

محدودهٔ تغییرات R_L ـ از حداقل تا حداکثر ـ را می توان مطابق شرح زیر به دست آورد.

در تعیین حداقل R_L دیود زنر باید در آستانه هدایت باشد، یعنی تمام جریان I_S از R_L می گذرد . به عبارت دیگر ، چون زنر در آستانهٔ هدایت است و جریان نمی کشد ، بایستی ماکزیمم جریان مدار از حداقل R_L ـ که می تواند این وضعیّت را به وجود آورد ـ بگذرد. بنابراین :

$$I_Z = 0 \ , \ I_S = I_L$$

$$I_{S(max)} = \frac{V_i - V_L}{R_S} \qquad (1)$$

$$V_L = I_S \cdot R_L$$

با جایگزین کردن رابطهٔ (۱) در رابطهٔ (۲) ، خواهیم داشت:

$$R_{L\,min} = \frac{V_L}{I_{S\,max}} \qquad (2)$$

$$R_{L\,min} = \frac{V_L}{\frac{V_i - V_L}{R_S}} \rightarrow V_L = V_Z$$

$$\boxed{R_{L\,min} = \frac{V_Z R_S}{V_i - V_Z}}$$

هر مقداری از R_L که بیشتر از $R_{L\min}$ باشد، دیود زنر را هادی کرده ، جریانی از آن می گذرد . جریان ماکزیمم عبوری از R_L را ـ وقتی R_L حداقل است ـ می توان از رابطهٔ :

$$I_{L\max}=\frac{VL}{RL}=\frac{VZ}{RL\min}$$

به دست آورد . از لحظهٔ هدایت دیود زنر، یعنی عبور جریان از آن ، ولتاژ دو سر بار (V_i) که همان ولتاژ دو سر زنر (V_Z) است ، ثابت می ماند. در نتیجه ولتاژ دو سر R_S و جریان عبوری از آن ، برابر است با :

$$V_{RS} = V_i - V_z$$

$$I_S = \frac{Vs}{Rs}$$

جریان عبوری از دیود زنر، برابر است با :

$$I_Z = I_S - I_L$$

با افزایش R_L و رسیدن به حد ماکزیمم مقدار خود ، جریان عبوری از آن کاهش می یابد ؛ امّا چون جریان عبوری از R_S ثابت است ، بناچار جریان I_Z افزایش خواهد یافت و مقدارش در حد ماکزیمم است .

حداقل جریان عبوری از بار ، از رابطهٔ زیر به دست می آید :

$$I_{L\min} = I_S - I_{Z\max}$$

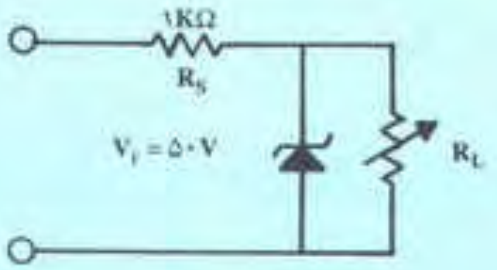
بنابراین ، حداکثر مقاومت بار با استفاده از قانون اهم ، برابر است با :

$$R_L = \frac{V_L}{I_L} \rightarrow R_{L\max} = \frac{V_L}{I_{L\min}} \rightarrow V_L = V_Z$$

$$\boxed{R_{L\max} = \frac{V_Z}{I_{L\min}}}$$

توان زنر نیز از رابطهٔ توان ، یعنی : $P_Z = V_Z.I_Z(\max)$ به دست می آید.

مثال ۳ـ۳ : در مدار شکل (۳۰ـ۳) برای داشتن ولتاژ ثابت ۱۲ ولت ، محدوده R_L و I_L و توان زنر را به دست آورید ($V_i = ۵۰\ V$ و $I_{Z\max} = ۳۳\ mA$)



شکل (۳۰ـ۳)

حل :

$$V_Z = V_L = ۱۲V$$

$$R_{L\min} = \frac{R_S V_Z}{V_i - V_Z} = \frac{۱K\Omega \times ۱۲V}{۵۰ - ۱۲} \cong ۳۱۵\Omega$$

ولتاژ دوسر R_S

$$V_S = V_i - V_Z = ۵۰ - ۱۲ = ۳۸ \text{ ولت}$$

جریان عبوری از R_S

$$I_S = \frac{V_S}{R_S} = \frac{۳۸V}{۱K\Omega} = ۳۸mA$$

حداقل جریان بار

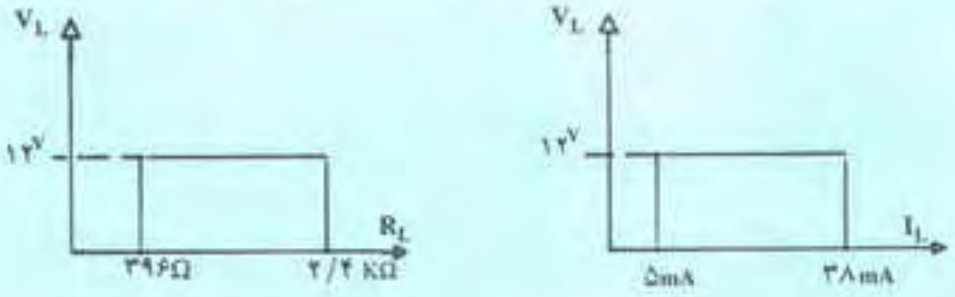
$$I_{L\min} = I_S - I_{Z\max} = ۳۸ - ۳۳ = ۵mA$$

حداکثر مقاومت بار

$$R_{L\max} = \frac{V_Z}{I_{L\min}} = \frac{۱۲}{۵} = ۲/۴K\Omega$$

$$P_Z = I_Z \cdot V_Z = ۱۲ \times ۳۳ = ۳۹۶ \text{ (mw)}$$

منحنیهای شکل (۳۱ـ۳) ، تغییرات V_L در مقابل R_L و I_L را نشان می دهد.



شکل (۳۱ـ۳) محدوده تثبیت V_L در مقابل I_L و R_L

۲ـ R_L ثابت و V_i متغیّر

درصورت ثابت بودن R_L ، حداقل ولتاژ ورودی، باید به اندازه ای باشد که بتواند دیود زنر را در آستانهٔ هدایت قرار دهد . حداقل ولتاژ ورودی از رابطهٔ زیر به دست می آید :

$$V_L = V_Z = \frac{R_L V_{i\min}}{R_L + R_S}$$

$$\boxed{V_{i\min} = \frac{(R_L + R_S)V_Z}{R_L}}$$

با افزایش ولتاژ ورودی دیود زنر ، جریان می کشد تا به مقدار حداکثری که ولتاژ دوسر بار ثابت بماند، برسد. لذا حداکثر V_i توسّط حداکثر جریان زنر ، محدود می شود .

یعنی :

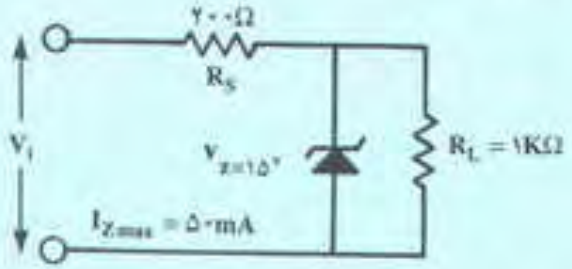
$$I_{Z\max} = I_{S\max} - I_L$$

$$I_{S\max} = I_{Z\max} + I_L$$

$$V_{i\max} = V_{S\max} + V_Z \qquad \text{یا}$$

$$\boxed{V_{i\max} = I_{S\max} \cdot R_S + V_Z}$$

مثال ۴ـ۳ : در مدار شکل (۳۲ـ۳) برای ثابت ماندن V_L در ۱۵ ولت با بار $R_L = 1K\Omega$ ، محدودهٔ ولتاژ ورودی را به دست آورید.



شکل (۳۲ـ۳)

حل :

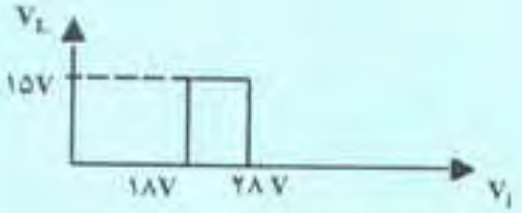
$$V_{i\min} = \frac{V_Z(R_L + R_S)}{R_L} = \frac{15(1000+200)}{1000} = 18V$$

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{V_Z}{R_L} = \frac{15}{1} = 15mA$$

$$I_{S\max} = I_{Z\max} + I_L = 50 + 15 = 65mA$$

$$V_{i\max} = (I_{S\max} \cdot R_S) + V_Z = (65 \times 0/2) + 15 = 28V$$

منحنی تغییرات V_L در مقابل تغییرات V_i ، در شکل (۳۳ـ۳) نشان داده شده است.



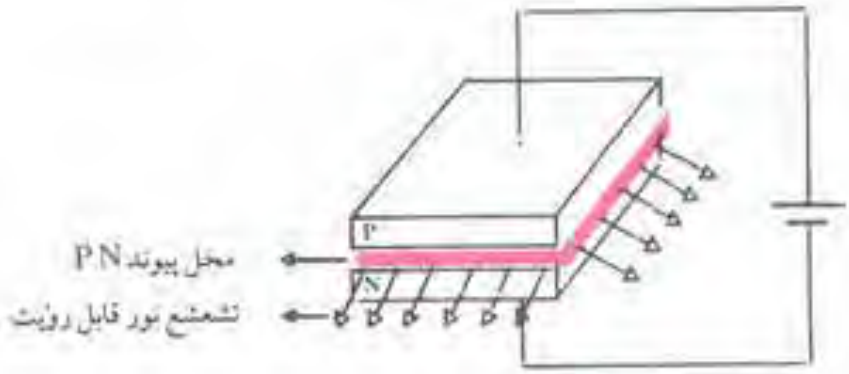
شکل (۳۳ـ۳) محدودهٔ تثبیت V_L به ازای تغییرات ولتاژ ورودی

۱۴ـ۳ـ دیود نور دهنده LED[1]

همانطور که از نامش پیداست ، این دیود مولد نور می باشد. دیود نوردهنده ، از دو قطعهٔ نیمه هادی نوع P و N تشکیل شده است . هر گاه بر روی این دیود، در بایاس مستقیم

۱ـ Light Emitting Diode

ولتاژی قرار گیرد و شدت جریان به اندازه کافی باشد ، دیود ، از خود نور تولید می کند . نور تولیدی در محل اتصال PN به وجود می آید . شکل (۳۴ـ۳)



شکل (۳۴ـ۳) نمایش فیزیکی LED

نور تولیدی بستگی به جنس به کار برده شدهٔ نیمه هادی دارد و معمولاً به رنگ مادون قرمز (نامرئی) ـ قرمز ـ نارنجی ـ سبز و زرد (مرئی) ساخته شده است . نوعی از این دیودها از جنس گالیم آرسنید (GaAs) و گالیم فسفات (GaP) و گالیم آرسنید فسفات (GaAsP) می باشد که نور بیشتری نسبت به بقیه دیودها تولید می کنند . نور تولید شده ، نتیجه بعضی ترکیبات بین حفره و الکترون می باشد که به صورت پالسهای نور ظاهر می شود . لازم به تذکر است که این عمل برای دیودهای معمولی نیز اتفاق می افتد لکن فرکانس نور یا پالسهای تولید شده به اندازه ای است که قابل رؤیت نمی باشد .

بیشترین نور در محل پیوند PN به وجود می آید زیرا ترکیبات بین الکترون و حفره در محل پیوند به مراتب از جای دیگر دیود بیشتر است . منحنی دیود نور دهنده ، نسبت به جریان عبوری از آن در شکل (۳۵ـ ۳) نشان داده شده است .

شکل (۳۵ـ۳) منحنی دیود نور دهنده

همانطوری که از منحنی پیداست ، منحنی کاملاً خطی است ، بنابر این با دیود LED می توان سیگنالهای الکتریکی را به نور تبدیل نمود ، بدون آنکه در نور به دست آمده اعوجاجی به وجود آید .

مقـدار نوری که از دیود خارج می شود به وسـیله شکل فیزیکی آن کنتـرل می گردد. شکل نیمکره ای ، قـادر به خارج کردن نور بیشـتری می باشد. از این رو این شکل فـیزیکی بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد.

برتریهای LED بر لامپ معمولی ، عبارتند از:

۱ ـ کوچک بودن و نیاز به فضای کم

۲ ـ محکم بودن و داشتن عمر طولانی (حدود صد هزار ساعت کار)

۳ ـ قطع ووصل سریع نور

۴ ـ تلفات حرارتی کم

۵ ـ ولتاژ کار کم ، بین ۱/۷ تا ۳/۳ ولت

۶ ـ جریان کم ، حدود چند میلی آمپر با نور قابل رؤیت

۷ ـ توان کم ، حدود ۱۰ تا ۱۵۰ میلی وات

نمای مـداری دیود نور دهـنده را در مـدارات ، به صـورت شکل (۳۶ ـ ۳) نشان می دهند .

شکل (۳۶ـ۳) نمای مداری LED

از دیودهای نور دهنده با رنگهای مختلف (قرمز ، سبز ، زرد ، سفید و جدیداً آبی) می توان برای نمایش الفبای عـددی استفاده نمود ، که مهمتـرین آنها سون سگمنت[1] (هفت قطعه ای) می باشد کـه برای نمایش اعداد به کار می برند. شکل (۳۷ ـ ۳) نمای دیودی و

شکل (۳۷ـ۳) نمایش دیودی و اعداد حاصل از سون سگمنت

نمایش اعداد حـاصل از اعمال ولتاژ مناسب به دیود های هفت قطعـه ای را نشان می دهد .

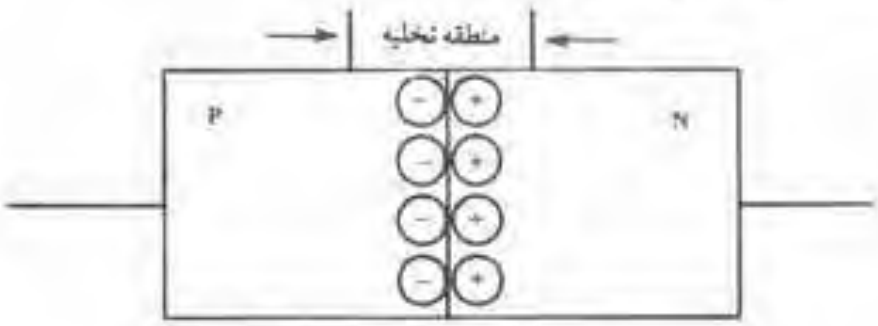
---

۱ ـ Seven segment

جدیداً سون سگمنتهای خاصّی ساخته شده که در آن از دو LED استفاده گردیده است . اگر ولتاژ تغذیه آن معکوس شود رنگ آن از قرمز به سبز یا بالعکس عوض می شود.

۱۵ ـ ۳ ـ دیود خازنی (واراکتور)[1]

دیود خازنی ، مانند یک دیود معمولی است و از دو قطعه نیمه هادی نوع P و N که معمولاً از جنس سیلیسیم است، ساخته می شود . همانطور که قبلاً یاد گرفتیم ، یک دیود معمولی ، بدون اینکه آنرا بایاس کنیم در محل اتّصال یک لایه سد بوجود می آمد (این لایه به عنوان یک عایق بین نیمه هادیهای P و N بود) اگر دو نیمه هادی P و N را به عنوان دو هادی و لایهٔ سد را به عنوان عایق به حساب بیاوریم ، مجموعه دیود به عنوان یک خازن می باشد . (خازن عملاً در منطقهٔ تخلیه به وجود می آید) . ظرفیّت خازن منطقه تخلیه حدود پیکوفاراد (PF) است . شکل (۳۸ ـ ۳)



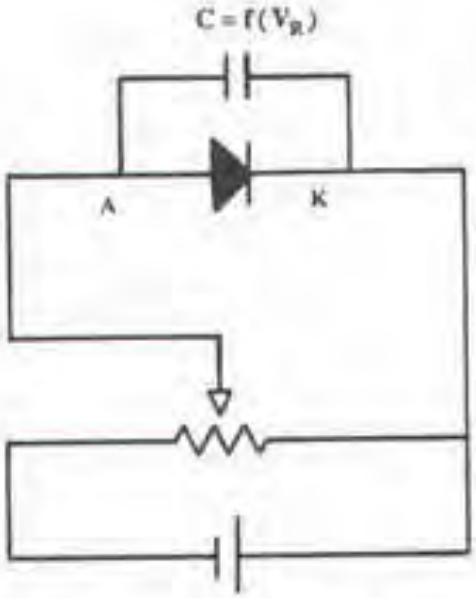
شکل (۳۸ـ۳) منطقه تخلیه دیود واراکتور

اگر دیود را در بایاس معکوس به کار ببریم ، عرض ناحیهٔ تخلیه بیشتر می شود و عایق بین دو نیمه هادی نیز افزایش می یابد ، در نتیجه ظرفیّت خازن آن کمتر می گردد. بنابراین می توان با تغییر مقدار ولتاژ معکوس ، ظرفیّت خازن را تغییر داد. پس ، دیود خازنی همیشه در بایاس معکوس قرار می گیرد. دیود خازنی ، اندکی با دیودهای معمولی تفاوت دارد. اولاً جریان اشباع معکوس آن فوق العاده کم است ودرثانی ،سطح دو نیمه هادی را طوری انتخاب می کنند که حداکثر بتواند خازنی به ظرفیّت ۲/۵ ناتوفاراد، ایجاد کند. دیودهای خازنی ۳۰۰PF ، از رایج ترین دیودهای این نوعند. شکل (۳۹ ـ ۳) مدار معادل دیود واراکتور با تغذیه معکوس را نشان می دهد.

از این دیودها ، در مدارات رادیو و تلویزیون به عنوان یک خازن متغیّر استفاده

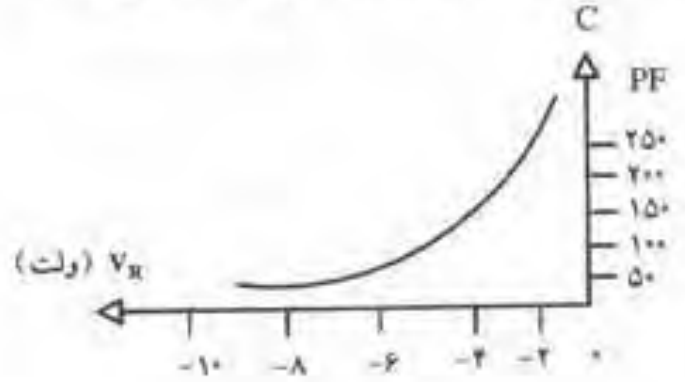
---

۱ ـ Varactor = Voltage - Variable Capacitor



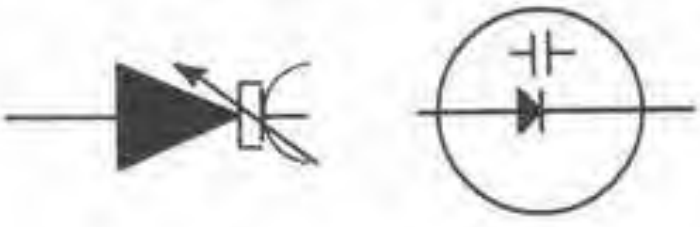
شکل (۳۹ـ۳) مدار معادل دیود واراکتور با تغذیه معکوس

می‌شود ، زیرا دارای حجمی بسیار کم ، ظریف و محکم می باشند. شکل (۴۰ ـ ۳) منحنی تقریبی ظرفیّت خازن نسبت به ولتاژ معکوس را نشان می دهد.



شکل (۴۰ـ۳)

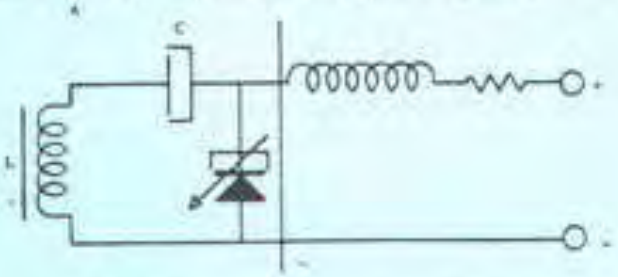
در مدارات الکترونیکی ، دیود خازنی را مطابق شکل (۴۱ ـ ۳) نشان می دهند.



شکل (۴۱ـ۳) نمای مداری دیود واراکتور

برای مطالعه آزاد

یکی از کاربردهای مهم دیود خازنی ، درمدارات کنترل فرکانس و تبدیل تغییرات ولتاژ dc به تغییرات فرکانس می باشد. به عنوان مثال، مدار شکل (۴۲ـ۳)، مدار موازی LC در حالت رزنانس می باشد که فرکانس رزنانس آن با ولتاژ dc ورودی تغییر می کند.



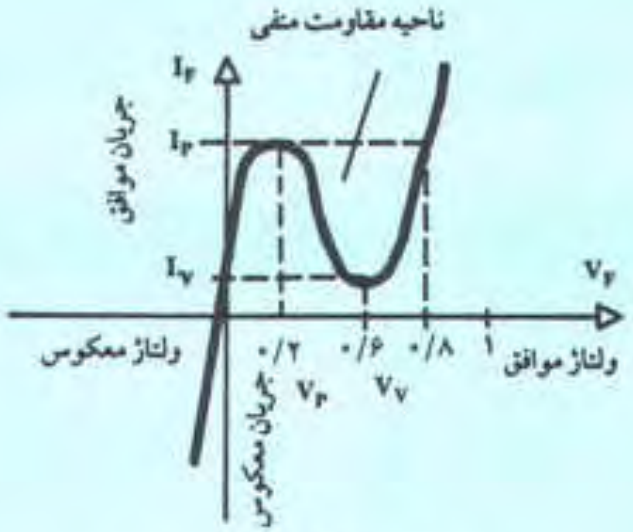
شکل (۴۲ـ۳) کاربرد دیود واراکتور در کنترل فرکانس

مدار قسمت A یک مدار رزنانس است. خازن C جهت جلوگیری از عبور ولتاژ dc به سلف (L) به کار برده شده است. در ضمن، این خازن با ظرفیّت خازنی دیود سری شده است تا از تغییرات شدید فرکانس، جلوگیری به عمل آید.

۱۶ ـ ۳ ـ دیود تونلی

دیود تونلی از دو قطعه نیمه هادی نوع P و N که غالباً از جنس ژرمانیم و گالیوم آرسنید می باشد ساخته شده است و دارای یک ناحیه مقاومت منفی می باشد. میزان ناخالصی در دیود تونلی ، نسبت به دیود معمولی بسیار زیاد است (حدود چند هزار برابر) که این خود باعث به وجود آمدن یک ناحیهٔ تهی بسیار نازک، در محل پیوند می شود. ناحیهٔ نازک تهی سبب می شود تا حاملهای زیادی به جای اینکه در ولتاژهای پایین عبور نمایند از آن تونل بزنند. شکل (۴۳ـ۳) مشخّصه یک دیود تونلی را نشان می دهد. با افزایش ولتاژ موافق، از صفر تا V_p ، بر خلاف دیود معمولی جریان عبوری تا I_p افزایش سریع دارد. از V_p به بعد با افزایش ولتاژ موافق تا V_V جریان کاهش سریع دارد. فاصله ولتاژ پیک(V_p) تا ولتاژ دره(V_p) را ناحیه مقاومت منفی گویند.

پدیده تونل بدین صورت است که در بایاس موافق، الکترونها (حاملهای اکثریت) قبل از رسیدن به ناحیه تهی به طور آزاد و مستقیم حرکت می کنند. به محض رسیدن به ناحیهٔ تهی، به صورت نمایی به طرف پایین منحرف می شوند تا از ناحیه تهی بگذرند. این پدیده، نمایشگر همان زدن تونل است که الکترونها با سرعت زیادتر از حاملها، در دیود معمولی از

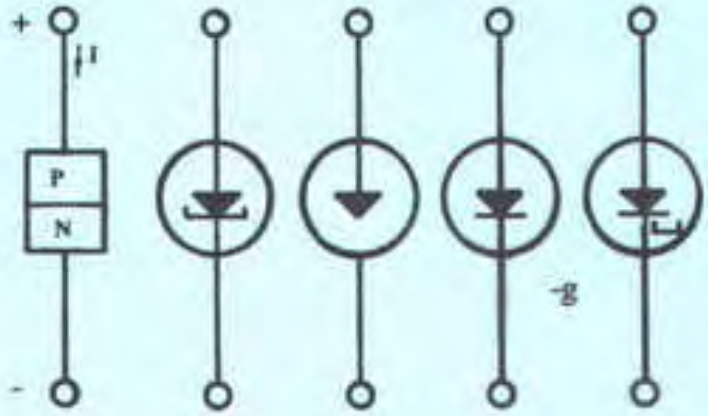


شکل (۴۳ـ۳) مشخصه دیود تونلی

ناحیه تهی بگذرنـد. نسبت جریان پیک (I_P) به جریان دره (I_V) در کاربردهای این دیود بسیـار مـهم است. این نسبت برای ژرمـانیم ۱۰ به یک و برای گـالیم آرسنیـد ۲۰به یک می باشد.

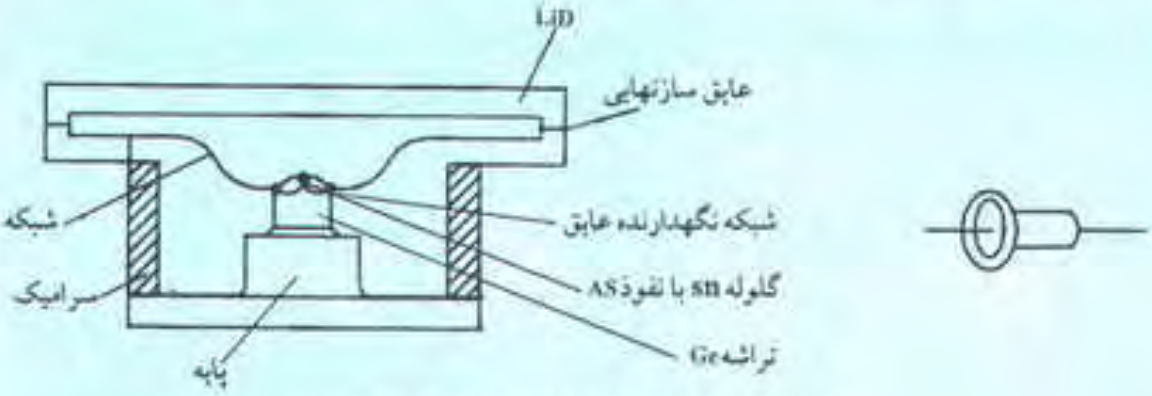
جریان پیک (I_P) در دیود تونلی، می تواند بین چند میکروآمپر تا چند صد آمپر متغیّر باشد. در حالیکه ولتاژ دره (V_V) دو سر دیود از حدود ۰/۶ ولت تجاوز نمی کند. به همین دلیل است که اتّصال ولـت متری با باتری ۱/۵ ولت ، به طور نادرست به دو سر دیود تونلی به آن صدمه می زند.

نمادهای مداری دیود تونلی در شکل (۴۴ـ۳) کشیده شده است.



شکل (۴۴ـ۳) مدار معادل ونمای دیود تونلی

نمای ظاهری و ساختمان این دیود، در شکل (۴۵ـ۳) آمده است. هر چند که کاربرد دیودهای تونلی در دستگاههای فرکانس بالا، امروزه به علت ساخت قطعات دیگری که در فرکانس بالا کار می کنند کمتر شده ولی هنوز به خاطر سادگی، تغذیهٔ خیلی کم و ضریب بالای اطمینان آن، موارد استفاده های زیادی دارد.



شکل (۴۵ـ۳) نمای ظاهری و ساختمان دیود تونلی

۱۷ ـ ۳ ـ فتو دیود[1]

ساختمان فتو دیود، مانند یک دیود معمولی با اتّصال PNمی باشد. با این تفاوت که محل پیوند PN، جهت تابانیدن نور به آن از مواد پلاستیکی سیاه پوشیده نمی باشد، بلکه توسّط شیشه و یا پلاستیک شفاف پوشیده می گردد تا نور بتواند بآسانی به آن بتابد. روی اکثر فتودیودها، یک لنز بسیار کوچک نصب می شود تا بتواند نور تابانیده شده به آن را متمرکز کرده، به محل پیوند برساند. شکل (۴۶ـ۳)

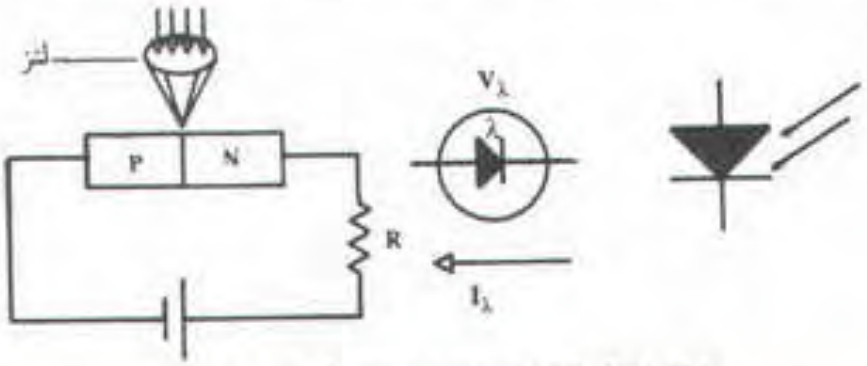
شکل (۴۶ـ۳) فتودیود همراه با لنز

فتو دیود همیشه در بایاس معکوس به کار می رود و با تابش نور به محل پیوند آن، جریان معکوس آن افزایش می یابد (افزایش جریان به علت شکستن پیوندها با انرژی نور می باشد). هر چه نور تابانیده شده به محل پیوند PN بیشتر باشد مقدار جریان معکوس آن نیز بیشتر می شود و برعکس، هر چقدر نور تابانیده شده به آن کمتر باشد مقدارجریان

---

۱ ـ Photo Diode

معکوس آن کمتر می شود. شکل (۴۷ ـ ۳) نمای مداری و بایاسینگ این دیود را نشان می دهد.

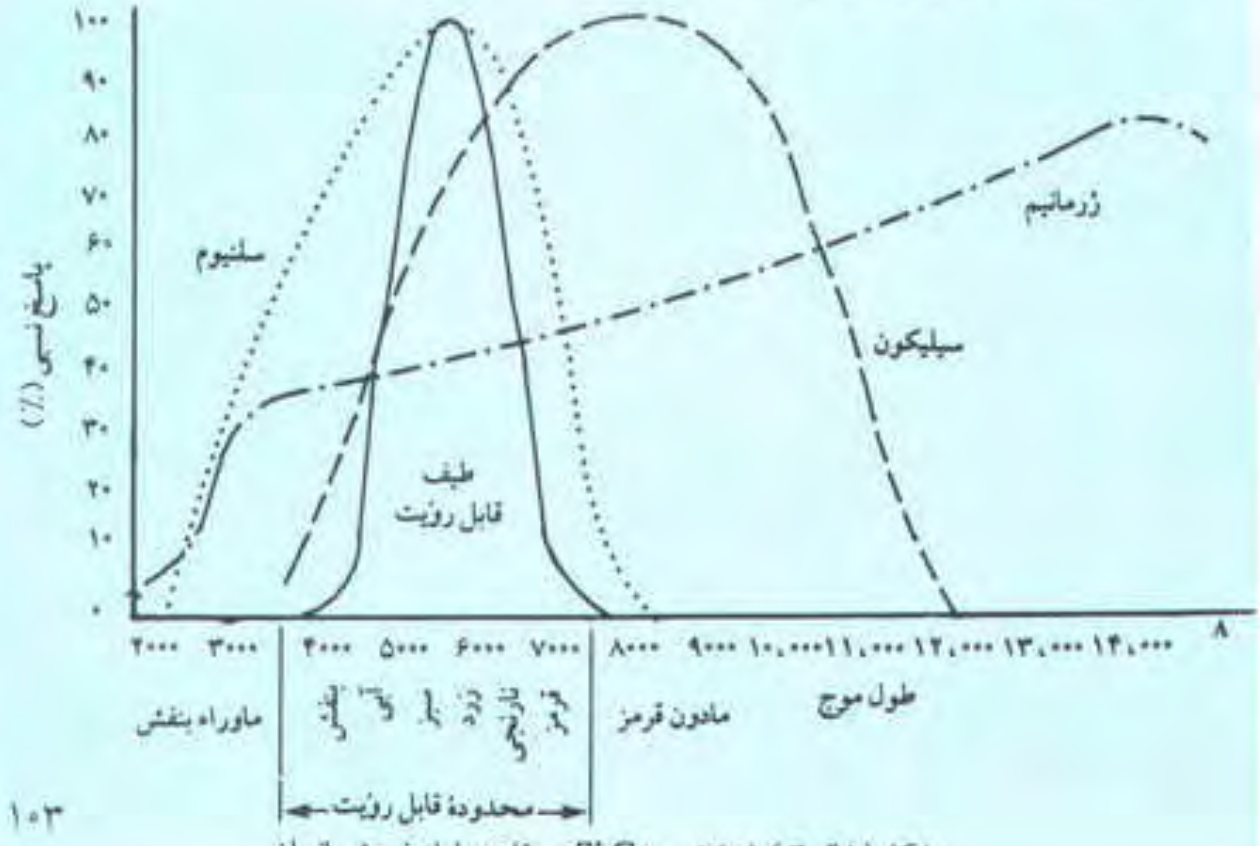


شکل (۴۷ـ۳) نمای مداری و بایاسینگ فتودیود

برای مطالعه آزاد

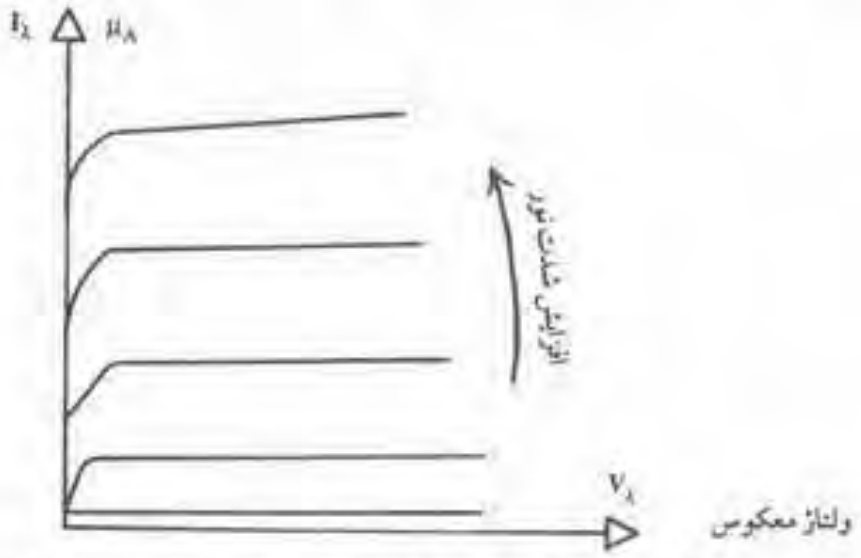
جریان معکوس فتو دیود علاوه بر اینکه با تغییر شدت نور، تغییر می کند، با تغییر طول موج نیز تغییر می کند. علامت λ روی علامت اختصاری فتو دیود همین مطلب را می رساند.

اهمیّت طول موج به خاطر این است که با توجّه به طول موج، ماده نیمه هادی را انتخاب می کنند. شکل (۴۸ ـ ۳) درصد پاسخ نسبی مربوط به طول موج نیمه هادیهای ژرمانیم، سیلیسیم و سلنیوم را به همراه باند نور مرئی، نشان می دهد. بعضی از فتودیودها فقط با اشعه مادون قرمز کار می کنند.



شکل (۴۸ـ۳) پاسخ نسبی Si،Ge در مقایسه با پاسخ چشم انسان

منحنی مشخصه یک فتو دیود در شکل (۴۹ ـ ۳) رسم شده است . این منحنی فقط به ازای طول موج ثابت و شدت روشناییهای مختلف رسم شده است . همانطوری که از منحنی پیداست با افزایش شدت نور، جریان I_λ نیز افزایش پیدا می کند و تقریباً در



شکل (۴۹ـ۳) منحنی مشخصه فتودیود به ازای تغییرات شدت روشنایی

ولتاژهای مختلف معکوسی که دو سر آن قرار گرفته است ، در یک نور مشخص ثابت می ماند، مقدار آن فقط بستگی به نور تابانیده شده به محل پیوند PN دارد . در ضمن همیشه حدود چند دهم ولت ولتاژ دو سر اتّصال PN، در حالت بدون بایاسینگ به وجود می آید .

از این دیود برای تشخیص نور و همچنین سنجش نور در دستگاههای نورسنج ، شمارش سریع یا سویچ کردن و موارد مشابه دیگر استفاده می شود. ولتاژ معکوس این دیودها، حدود ۵۰ ـ ۲۰ ولت و توان آنها حدود چند صد میلی وات و جریان معکوس آنها در تاریکی حدود چند نانو آمپر است . به عنوان مثال المان شماره TIL۴۱۳ یک فتو دیود می باشد که ولتاژ معکوس آن ۳۰ ولت و توان آن ۱۵۰ میلی وات و جریان معکوس آن در تاریکی حدود ۵نانو آمپر می باشد (این همان جریان اشباع معکوس در دیودهای معمولی است) .

لازم به تذکر است که فتو رزیستانس نیز می تواند در بعضی موارد جایگزین فتودیود شود، زیرا مقاومت هر دو تابع نور می باشد. تفاوت این دو المان ، در سرعت کار آنها است . فتو دیود سرعت عمل بسیار بیشتری نسبت به فتورزیستانس دارد . البته نا گفته نماند که فتودیود در محدوده' فرکانس وسیع تری نیز نسبت به فتو رزیستانس می تواند کار کند .

پرسش

۱ ـ اتّصال PN را توضیح دهید.

۲ ـ خصوصیّات اتّصال PN را بنویسید.

۳ ـ پتانسیل سد چیست ؟ مقدار آن برای ژرمانیم و سیلیسیم چقدر است؟

۴ ـ نمای ظاهری و مداری دیود را رسم کنید.

۵ ـ منحنی مشخّصه ولت آمپر دیود معمولی را برای ژرمانیم و سیلیسیم رسم کنید.

۶ ـ مقاومت استاتیکی و دینامیکی دیود را تعریف کنید و روابط مربوط را بنویسید.

۷ ـ مدار معادل دیود معمولی را بکشید.

۸ ـ مقادیر حد در دیودها را نام ببرید.

۹ ـ چگونگی امتحان کردن دیود را شرح دهید.

۱۰ ـ انواع دیودهای نیمه هادی را نام ببرید.

۱۱ ـ منحنی مشخّصه دیودها را با هم مقایسه کنید.

۱۲ ـ خصوصیّات و اصول کار دیود زنر را توضیح دهید.

۱۳ ـ روابط محاسبهٔ محدودهٔ R_L و V_i را برای داشتن خروجی ثابت یک مدار ساده زنری بنویسید.

۱۴ ـ برتریهای LED بر لامپ معمولی را بنویسید.

۱۵ ـ دیود واراکتور در چه بایاسی کار می کند؟ عامل متغیّر در دیودواراکتور چیست؟

۱۶ ـ یکی از کاربرد های مهم دیود واراکتور را با ذکر مثال توضیح دهید.

۱۷ ـ دیود تونلی در چه بایاسی کار می کند؟

۱۸ ـ مقاومت منفی و پدیده تونلی را شرح دهید.

۱۹ ـ فتو دیود در چه بایاسی کار می کند؟ چگونگی تغییر جریان معکوس با تابش نور را توضیح دهید.

۲۰ ـ چه المانی می تواند جایگزین فتودیود شود؟ نام ببرید.

۲۱ ـ با توجه به شکل (۳۱ـ۳) درصورتیکه مقاومت بار کمتر از $R_{L\min}$ و بیشتر از $R_{L\max}$ شود، در خروجی تثبیت ولتاژ نداریم، علت را توضیح دهید.

فصل چهارم

کاربرد دیودها
(یکسو سازی، چند برابرکنندگی و تغییر دهندگی شکل موج)

هدفهای رفتاری : فراگیر در پایان این فصل خواهد توانست :

۱ ـ یکسوسازی را تعریف کند.

۲ ـ یکسوکننده های نیم موج، تمام موج و پل را توضیح دهد .

۳ ـ فرق بین یکسوکننده های نیم موج و تمام موج را بیان کند .

۴ ـ یکسوکننده تمام موج و پل را با هم مقایسه کند.

۵ ـ صافی (فیلتر) را تعریف کند.

۶ ـ اثرات صافی ها را در یکسو کننده های نیم موج، تمام موج و پل را توضیح دهد.

۷ ـ اصول کار مدارات چند برابر کنندهٔ ولتاژ را شرح دهد.

۸ ـ مدار چند برابر کنندهٔ ولتاژ را ترسیم کند.

۹ ـ کاربرد مدار چند برابر کنندهٔ ولتاژ را بنویسد.

۱۰ ـ اصول کار مدارات محدودکننده را توضیح دهد.

۱۱ ـ مدارات محدود کننده را رسم کند.

۱۲ ـ کاربرد مدارات قیچی کننده (Clipper) ومدارات مهارکننده (Clamper) را توضیح دهد.

۱۳ ـ با استفاده از کتاب راهنمای دیودها، نوع دیود دلخواه را انتخاب و پایه های آن را مشخص کند.

۱۴ ـ کاربرد انواع دیودها و روشهای نامگذاری آنها را نام ببرد.

۱ ـ ۴ ـ مقدمه

در فصول گذشته به شرح ساختمان، مشخّصات و معرّفی انواع دیودهای نیمه هادی

پرداختیم. دراین فصل با کاربرد دیود در مدارات مختلف، از جمله یکسو کننده های دیودی، چندبرابر کننده ها و تغییر دهنده های شکل موج آشنا خواهید شد. هرچند محدودهٔ کاربرد دیود زیاد است ولی اصول کار آن در زمینه های مختلف یکسان می باشد.

۲ ـ ۴ ـ مدارات یکسو کننده های دیودی

مدارات یکسوکننده های دیودی، مداراتی هستند که ولتاژ متناوب را تبدیل به ولتاژ مستقیم (یکطرفه) می نمایند. عنصر اصلی این مدارات دیود می باشد. زیرا همانطور که دیدیم، دیود در یک جهت جریان را هدایت می کند در حالی که در جهت دیگر قطع می باشد. مدارات یکسو کننده، می توانند علاوه برولتاژ یکفازه، ولتاژهای چندفازه (سه یا شش فازه) را نیز، تبدیل به ولتاژ مستقیم نمایند.

به طور کلّی سه نوع مدار یکسو کننده یکفازه بسته می شود:

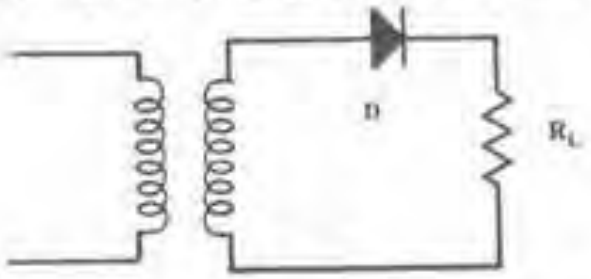
۱ ـ مدار یکسوکنندهٔ نیم موج

۲ ـ مدار یکسو کنندهٔ تمام موج با ترانس سر وسط

۳ ـ مدار یکسوکنندهٔ تمام موج پل (Bridge)

اینک به توضیح هریک از مدارات یکسوکننده فوق می پردازیم.

۱ ـ ۲ ـ ۴ ـ مدار یکسو کنندهٔ نیم موج : شکل (۱ ـ ۴) مدار یکسو کننده نیم موج را نشان می دهد. در این مدار یکسو کننده و مدارات دیگر، فرض می شود که دیودهای به کار



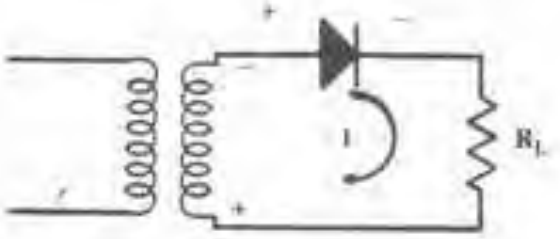
شکل (۱ ـ ۴) یکسو ساز نیم موج

برده شده ایده آل هستند؛ یعنی، هیچ گونه افت ولتاژی دو سر آنها به وجود نخواهد آمد، ولی در عمل حدود ۰/۶ تا ۱/۵ ولت (بسته به جریان عبوری از دیود) دو سر دیود افت می کند.

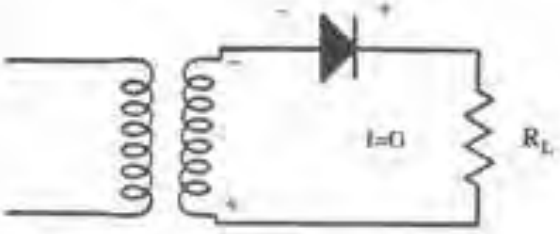
طرز کار مدار فوق، به این صورت است که، در مدت نیم سیکل مثبت، دیود در بایاس مستقیم قرار گرفته، هادی می باشد. لذا، جریان در نیم سیکل مثبت از دیود وبارعبور کرده، مسیر خود را می بندد. بنابراین، تمام ولتاژ ثانویهٔ ترانسفورماتور در نیم سیکل مثبت دو سر بار، ظاهر خواهد شد.

در مدت نیم سیکل منفی، دیود در بایاس معکوس است و قطع می باشد. لذا، از مدار

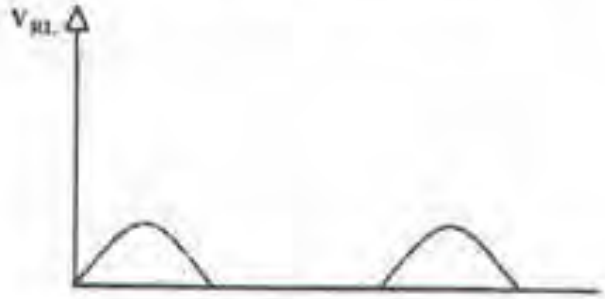
جریان عبور نمی کند. بنابراین، ولتاژ دو سر بار در نیم سیکل منفی، صفر می‌باشد. شکل (۲ ـ ۴)



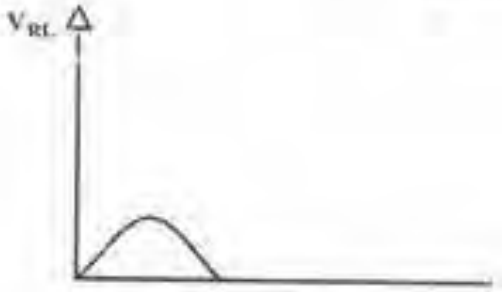
در این حالت دیود هادی می باشد



در این حالت دیود قطع می‌باشد



شکل ولتاژ خروجی



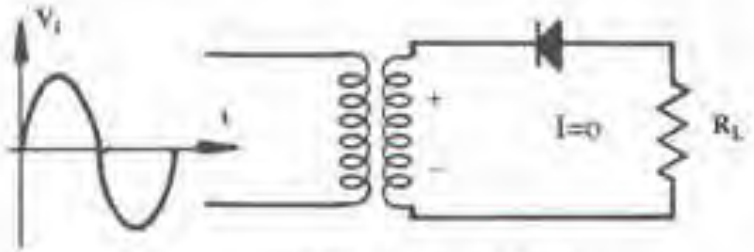
شکل ولتاژ خروجی

شکل ولتاژ خروجی

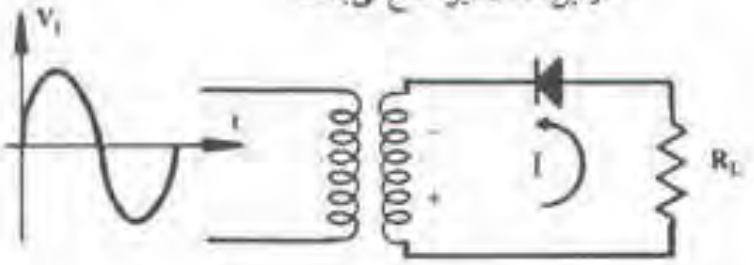
شکل (۲ـ۴) شکل موج خروجی در R_L

اگر دیود به طور معکوس بسته شود «نسبت به شکل (۲ ـ ۴)» در مدت نیم سیکلِ مثبت قطع بوده، ولی در مدّت نیم سیکل منفی هادی می باشد. لذا فقط در مدت نیم سیکل

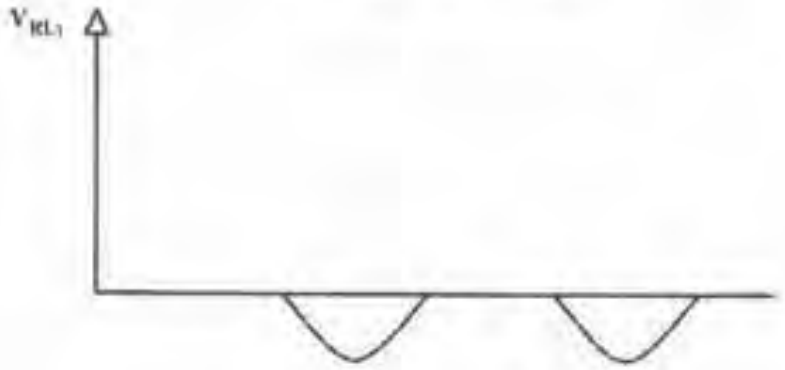
منفی دو سر بار ولتاژ خواهیم داشت. شکل (۳ـ۴) این مطلب را نشان می دهد.



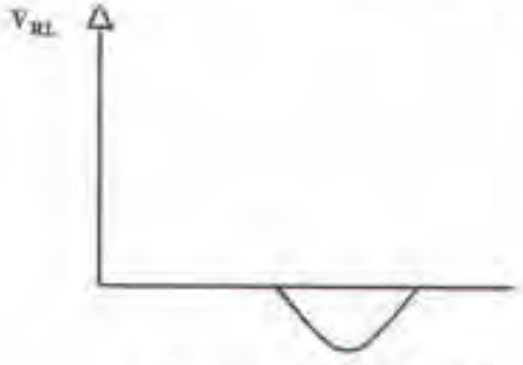
در این حالت دیود قطع می باشد



در این حالت دیود هادی است



شکل ولتاژ خروجی



شکل ولتاژ خروجی درنیم سیکل منفی

شکل ولتاژ خروجی در نیم سیکل مثبت

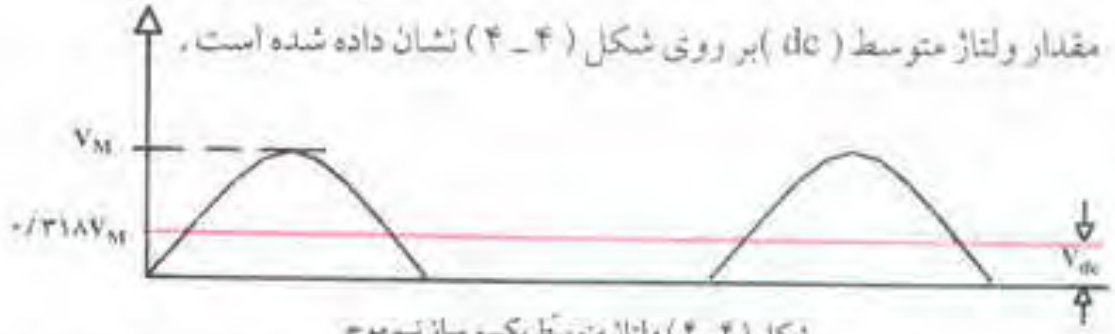
شکل (۳ـ۴) شکل موج خروجی

حال اگر یک ولت متر جریان مستقیم (dc) را در دو سر بار قرار دهیم، می خواهیم بدانیم ولت متر چه ولتاژی را نشان می دهد. همانطور که می دانیم ولت متر جریان مستقیم،

مقدار ولتاژ متوسّط را و ولت متر جریان متناوب، مقدار ولتاژ مؤثّر را نشان می دهد. چون در اینجا ولتاژ مستقیم (یکطرفه) می باشد، لذا ، در این حالت ولت متر مقدار ولتاژ متوسّط سیکلهای یکسوشده را نشان خواهد داد. مقدار متوسّط این ولتاژ یکطرفه، برابر است با:

$$V_{dc} = ۰/۳۱۸V_M$$

مقدار ولتاژ متوسط (dc)بر روی شکل (۴ـ ۴) نشان داده شده است.



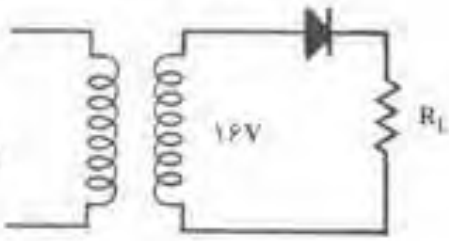
شکل (۴ـ۴) ولتاژ متوسّط یکسو ساز نیم موج

مثال : مقدار ولتاژ dc شکل (۵ ـ ۴) چقدر است؟ ولتاژ مؤثّر ثانویه ترانسفورماتور ۱۶ ولت می باشد و دیود نیز ایدآل فرض می شود.

$$V_{dc} = ۰/۳۱۸V_M$$

$$V_M = \sqrt{۲} \times V_e = ۱/۴۱ \times ۱۶ = ۲۲/۵ \quad \text{ولت}$$

$$V_{dc} = ۰/۳۱۸V_M = ۰/۳۱۸ \times ۲۲/۵ = ۷/۱۵ \quad \text{ولت}$$



شکل (۵ـ۴)

همانطور که می دانیم، یکی از پارامترهای مهّم مشخّصات الکتریکی دیود، تحمّل حداکثر ولتاژی است که در بایاس معکوس دوسر دیود قرار می گیرد. در یکسوکنندهٔ نیم موج، می خواهیم بدانیم حداکثر ولتاژی که دو سر دیود در بایاس معکوس قرار می گیرد، چقدر است؟

با توجّه به شکل (۶ـ ۴) هنگامی که دیود دربایاس معکوس قرار دارد (در مدت نیم سیکل منفی) جریان در مدار صفر می باشد واقت ولتا ژ دو سر بار نیز صفراست. لذا تمامی ولتاژ نیم سیکل منفی در دوسر دیود قرار می گیرد. حد اکثر این ولتاژ برابر حداکثر دامنه

---

۱ ـ مقدار متوسّط ولتاژ برابر سطح زیر سیکلهای یکسو شده می باشد که سطح منحنیهای یکسو شده را از طریق ریاضی از روابط زیر بدست می آورند:

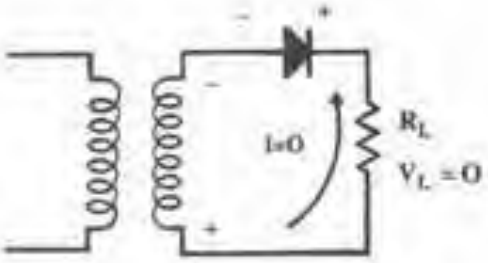
$$V_{dc} = V_{AV} = \frac{۱}{T}\int V dt = \frac{۱}{۲\pi}\int_{۰}^{\pi} V_M \sin \omega t d\omega t$$

$$V_{dc} = \frac{-V_M}{۲\pi}\left[\cos \omega t\Big|_{۰}^{\pi}\right] = \frac{-V_M}{۲\pi}[\cos \pi - \cos ۰] = \frac{-V_M}{۲\pi}[-۱ \ -۱]$$

$$V_{dc} = \frac{۲V_M}{۲\pi} = \frac{V_M}{\pi} = ۰/۳۱۸V_M$$

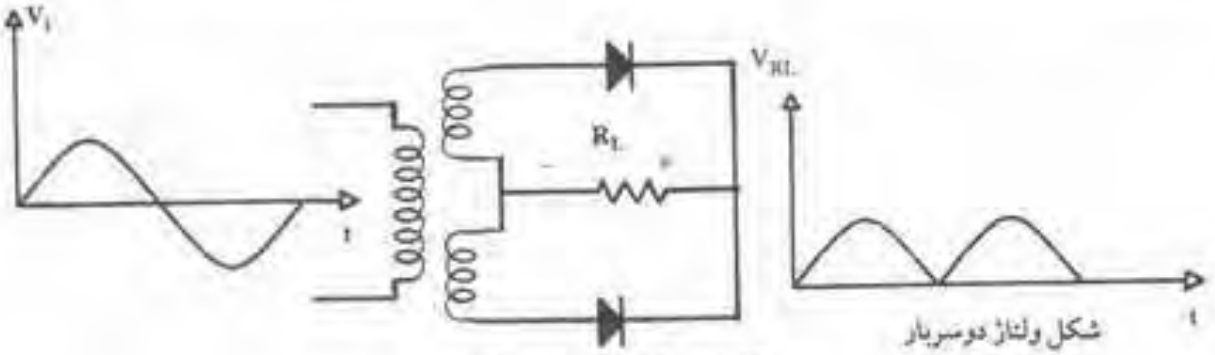
V_M می باشد. ولتاژ معکوسی که دوسر دیود قرار می گیرد با حروف PIV [1] و به صورت رابطهٔ زیر برای یکسوساز نیم موج نشان می دهند.

$$\text{PIV حداکثر} = V_{max}$$



شکل (۶ـ۴) ولتاژ دیود در بایاس معکوس

۲ـ۲ـ۴ـ مدار یکسو کننده تمام موج با ترانس سر وسط: عیب یکسوکنندهٔ نیم موج، در کم بودن مقدار ولتاژ متوسّط می باشد و مقدار آن از $۰/۳۱۸V_M$ بیشتر نمی شود. ضمناً، در این یکسوکننده از ولتاژ نیم سیکل منفی نیز استفاده ای نمی شود. گر چه در تعدادی از کاربردها از یکسوکنندهٔ نیم موج استفاده می شود. در یکسوکنندهٔ تمام موج، از دو دیود استفاده می شود و در ضمن در این مدار به یک ترانسفورماتور با دو سیم پیچ ثانویه با ولتاژهای مساوی نیاز است. شکل (۷ـ۴) یکسوکننده تمام موج را نشان می دهد.

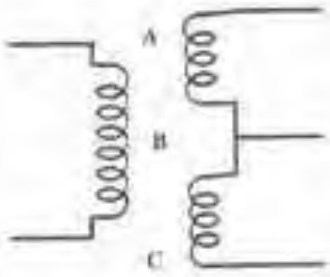


شکل ولتاژ دوسربار

شکل (۷ـ۴) یکسوساز تمام موج

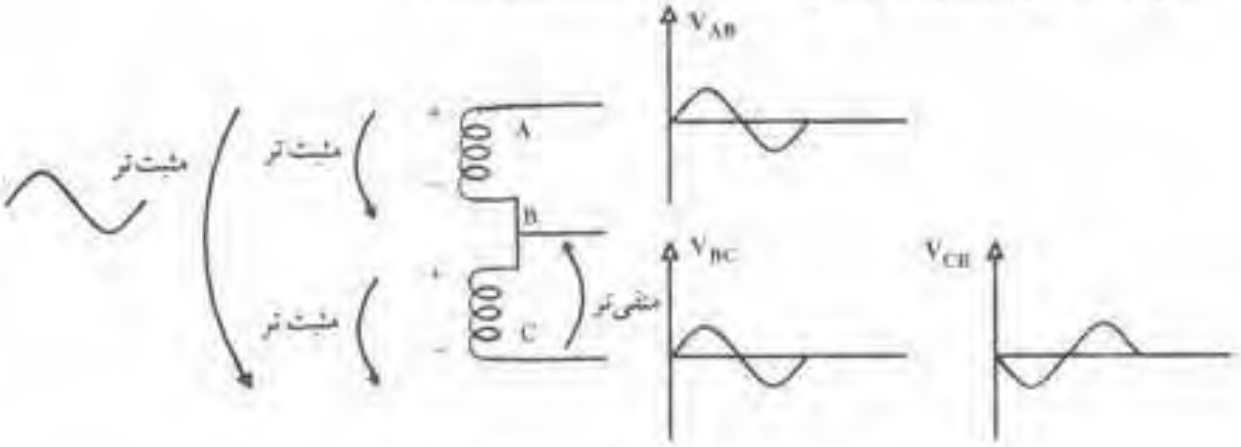
برای اینکه دریابیم چگونه ولتاژ خروجی این مدار مانند شکل (۷ـ۴) می شود، باید ببینیم ولتاژهای ثانویهٔ ترانسفورماتور، به چه صورت می باشد؟ همانطوری که در شکل (۷ـ۴) پیداست، دراین نوع یکسوکننده، از یک ترانسفورماتور با دو ولتاژثانویهٔ کاملاً مساوی استفاده شده است. ترانسفورماتور شکل (۸ـ۴) را در نظر می گیریم. ولتاژ دو نقطهٔ A و C دو برابر ولتاژ نقاط AB و یا BC می باشد؛ چون، دو ولتاژ با هم سری

۱ـ PIV=Peak Inverse Voltage



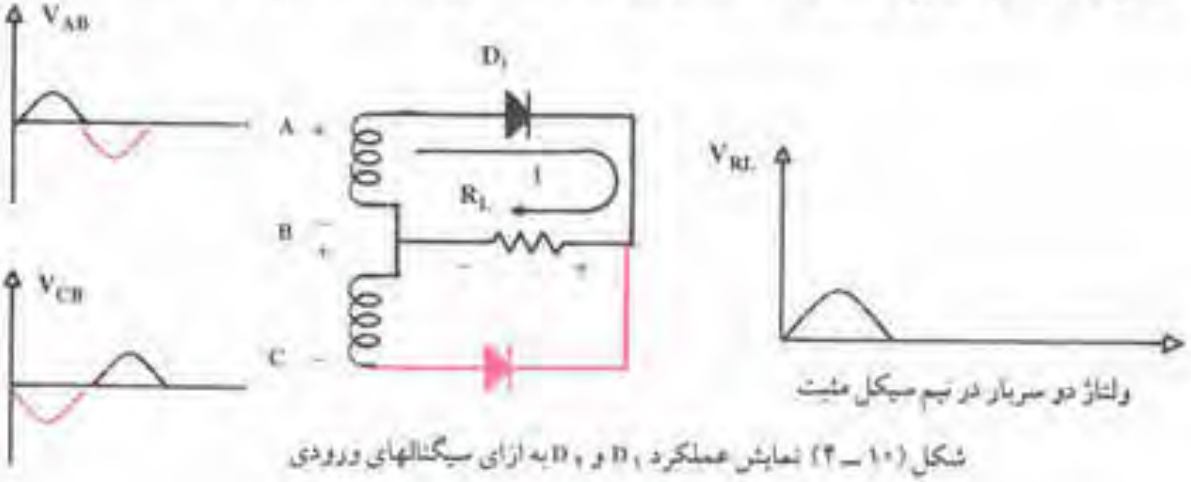
شکل (۸ـ۴) ترانسفورماتور با ثانویه سروسط

شده‌اند، یعنی، $V_{AC} = V_{AB} + V_{BC}$. در نیم سیکل مثبت، نقطهٔ A مثبت تر از نقطه B و C است و نقطهٔ B مثبت تر از نقطهٔ C می‌باشد. اگر نقطهٔ B را (سروسط ترانسفورماتور) مبنا بگیریم، نقطه A نسبت به مبنا (نقطه B) مثبت تر و نقطهٔ C نسبت به مبنا (نقطه B) منفی تر می‌باشد. این مطلب در شکل (۹ـ۴) نشان داده شده است.



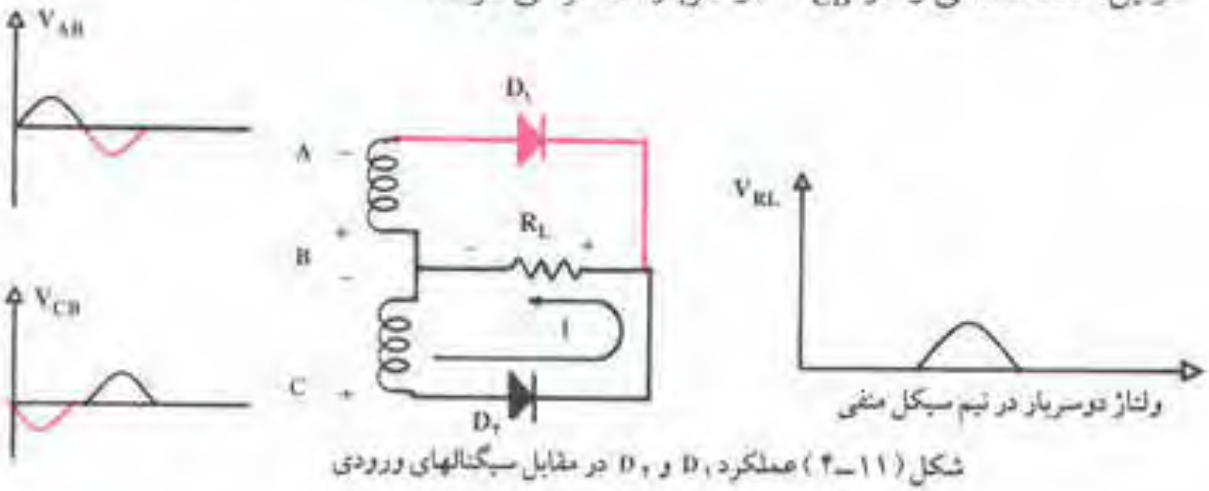
شکل (۹ـ۴) ولتاژهای ثانویه ترانس با سروسط

اینک که با طرز کار ترانسفورماتور با سر وسط آشنا شدیم، به بیان طرز کار یکسوکننده تمام موج می پردازیم. در مدت نیم سیکل مثبت، دیود D_1 در بایاس مستقیم می‌باشد و دیود D_2 در بایاس معکوس قرار دارد. بنابراین فقط دیود D_1 هدایت می کند. لذا تمامی ولتاژ نیم سیکل مثبت V_{AB} در دو سر بار، ظاهر می گردد. شکل (۱۰ـ۴)



شکل (۱۰ـ۴) نمایش عملکرد D_1 و D_2 به ازای سیگنالهای ورودی

در مدت نیم سیکل منفی، همانطوری که از شکل (۱۱ ـ ۴) مشاهده می شود، دیود D_2 در بایاس مستقیم است و هادی می باشد و دیود D_1 در بایاس معکوس قرار گرفته است. دراین حالت تمامی ولتاژ V_{CB} دو سربار، ظاهر می گردد.

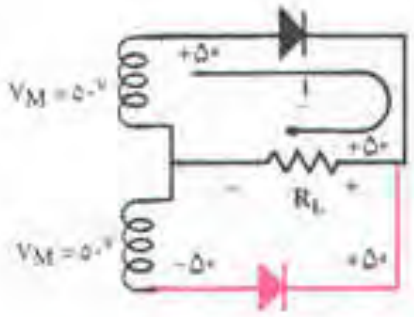


شکل (۱۱ـ۴) عملکرد، D_1 و D_2 در مقابل سیگنالهای ورودی

مقدار ولتاژ متوسّط خروجی، در یکسوکنندهٔ تمام موج، دوبرابر ولتاژ یکسوشدهٔ نیم موج می باشد، یعنی :

$$V_{dc} = ۲(۰/۳۱۸V_M) = ۰/۶۳۶V_M$$

حداکثر ولتاژی که در بایاس معکوس، در دو سر هر یک از دیودها قرار می گیرد، برابر $۲V_M$ می باشد. با توجه به شکل (۱۲ ـ ۴)، فرض می کنیم ولتاژ ماکزیمم



شکل (۱۲ـ۴) نمایش ولتاژ معکوس دریکسوساز تا به موج

$$۱ - V_{dc} = \frac{۱}{T}\int_{۰}^{T} V dt = \frac{۱}{\pi}\int_{۰}^{\pi} V_{M \sin \omega t d\omega t}$$

$$V_{dc} = \frac{V_M}{\pi}\int_{۰}^{\pi} \sin \omega t d\omega t = \frac{-V_M}{\pi}\left[\cos \omega\right]_{۰}^{\pi} = \frac{-V_M}{\pi}\left[\cos \pi - \cos ۰\right]$$

$$V_{dc} = \frac{-V_M}{\pi}[-۱-۱] = \frac{۲V_M}{\pi} = ۰/۶۳۶V_M$$

V_{AB} ترانسفورماتور برابر ۵۰ ولت باشد، زمانی که دیود D_2 در بایاس معکوس قرار دارد، به اندازه ۵۰- ولت ولتاژ درآند آن و ۵۰+ ولت ولتاژ در کاتد آن قرار می گیرد و اختلاف ولتاژ دو سر آن برابر $V_{100} = (-50) - +50$ می باشد. رابطهٔ ماکزیمم ولتاژ معکوس در یکسوکنندهٔ تمام موج به صورت زیر نوشته می شود:

یکسوکننده تمام موج P_{IV} (حداکثر) $= 2V_M$

مثال: در یکسوکننده تمام موج، اگر ولتاژ ثانویهٔ یک ترانسفورماتور (سر وسط و یکی از سرهای دیگر) برابر ۳۰ ولت باشد، مقدار ولتاژ متوسّط و حداکثر ولتاژی که دو سر هر یک از دیودها قرار می گیرد را حساب کنید.

حل:

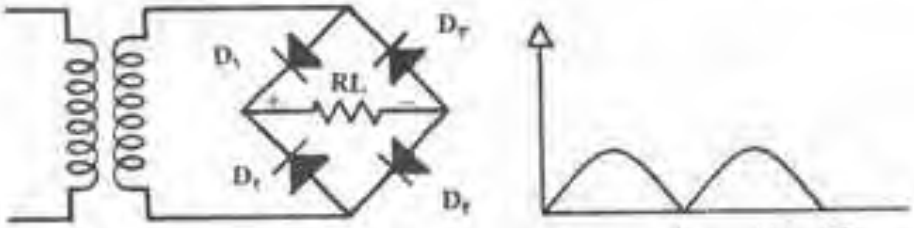
$$V_{dc} = 0/636 V_M$$

$$V_M = V_e \times \sqrt{2} = 30 \times 1/41 = 42/3 \quad \text{ولت}$$

$$V_{dc} = 0/636 \times 42/3 = 26/9 \quad \text{ولت}$$

$$P_{IV} = 2V_M = 2 \times 42/3 = 84/6 \quad \text{ولت}$$

۳ـ۲ـ۴ـ مدار یکسوکنندهٔ تمام موج پل[1]: نوع دیگری از یکسوکنندهٔ تمام موج، یکسوکنندهٔ پل می باشد. شکل (۱۳ـ۴) یک مدار یکسوکنندهٔ پل را، همراه با شکل موج یکسو شده، نشان می دهد.



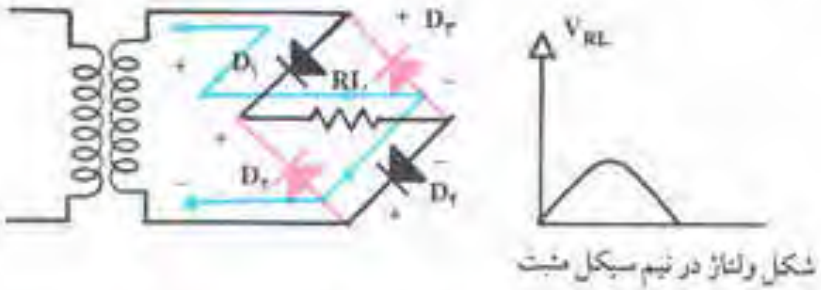
شکل (۱۳ـ۴) یکسوساز پل

همان طوری که از شکل (۱۳ـ۴) پیداست، دراین مدار یکسوکننده، از چهار دیود و یک سیم پیچ برای ولتاژ ثانویهٔ ترانسفورماتور استفاده شده است. طرز کار مدار با توجّه به شکل (۱۴ـ۴) بدین صورت است که در مدت نیم سیکل مثبت، دیودهای D_1 و D_2 در بایاس مستقیم ودیودهای D_3 و D_4 در بایاس معکوس می باشند.

بنابراین، جریان از دیود D_1 و بار R_L و دیود D_2 مسیر خود را می بندد. و با توجه به اینکه دیودها ایده‌آل فرض شده اند، لذا تمامی ولتاژ ثانویهٔ ترانسفورماتور، دو سربار ظاهر

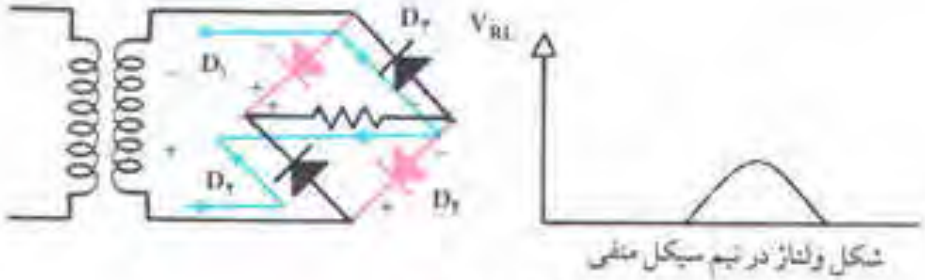
۱ـ Bridge Rectifier

می گردد.



شکل (۱۴ـ۴)

در مدّت نیم سیکل منفی، با توجه به شکل (۱۵ ـ ۴) دیودهای D_2 و D_3 در بایاس موافق و دیودهای D_1 و D_4 دربایاس معکوس می باشند. لذا، جریان از طریق دیودهای D_2 و D_3 و بار R_L مسیر خود را می بندد. دراین حالت نیز تمامی ولتاژ دو سر بار ظاهر می گردد.

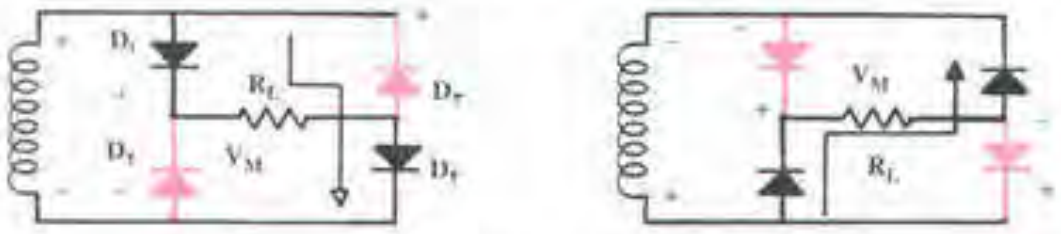


شکل (۱۵ـ۴)

مقدار ولتاژ متوسّط این مدار یکسوکننده نیز مانند یکسوکنندهٔ تمام موج می باشد.

یعنی: $V_{dc} = 0/636 V_M$

در مدار یکسوکنندهٔ پل، حدّاکثر ولتاژی که دربایاس معکوس دو سر هر دیود قرار می گیرد برابر با V_M می باشد؛ زیرا با توجه به شکل (۱۶ـ۴) در مدّت نیم سیکل منفی که دیود D_1 و D_2 هادی و دیودهای D_3 و D_4 در بایاس معکوس می باشند. پس ولتاژی که در بایاس معکوس دوسر هر دیود اعمال می شود برابر V_M می باشد.



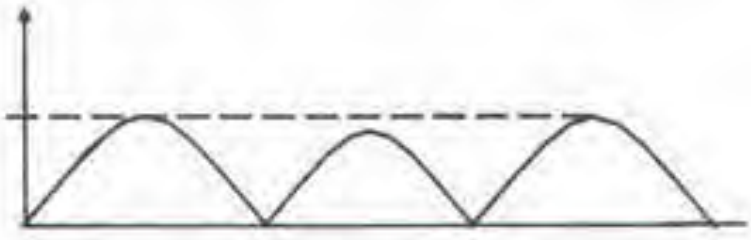
شکل (۱۶ـ۴)

۳ـ۴ ـ مقایسه مدار یکسوکننده تمام موج و پل

همانطور که دیدیم شکل موج و مقدار ولتاژ متوسّط خروجی (دوسربار) در هر دومدار یکسوکننده، کاملاًیکسان است، ولی هر یک از مدارات تمام موج و پل، دارای خصوصیّت ویژه ای از نظر المانهای به کار برده شده در آن، می باشند که تفاوت آنها درجدول زیر آمده است.

یکسو کننده تمام موج	یکسو کننده پل
۱ ـ نیاز داشتن به یک ترانسفورماتور با دو سیم پیچ ثانویهٔ مساوی	نیاز داشتن فقط به یک سیم پیچ ثانویه
۲ ـ احتیاج داشتن به دو دیود	احتیاج داشتن به چهاردیود
۳ ـ حداکثر ولتاژ معکوس هردیود برابر $۲V_M$ می باشد.	حداکثر ولتاژ معکوس هردیود برابر V_M می باشد.
۴ ـ امکان وصل کردن به شبکه، بدون ترانسفورماتور میّسر نیست.	امکان وصل کردن به شبکه، بدون ترانسفورماتور نیز میسر می باشد.

علاوه بر موارد فوق، اگر در یکسوکنندهٔ تمام موج، دو ولتاژ ثانویهٔ ترانسفورماتور با هم برابر نباشند، شکل موج خروجی به صورت شکل (۱۷ ـ ۴) خواهد شد.



شکل (۱۷ـ۴)

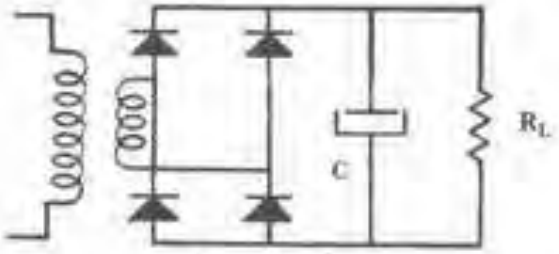
ولی در جریانهای زیاد، از آنجایی که قیمت دیودهای با آمپر زیاد، گران است، یکسوکننده تمام موج ترجیح داده می شود، زیرا فقط دو دیود درمدار آن به کار رفته است.

۴ ـ ۴ ـ صافیها

همانطور که دیدیم، توسط دیودها می توان ولتاژ متناوب را به ولتاژ یکطرفه (dc) تبدیل نمود، امّا این ولتاژ یکسوشده دارای نوسانات می باشد (با فرکانس ۱۰۰ هرتز در یکسوکنندهٔ تمام موج و ۵۰ هرتز در یکسوکنندهٔ نیم موج). درالکترونیک بیشترنیاز به یک ولتاژ ثابت است. برای این که بتوانیم این ولتاژ نوسان دار را به یک ولتاژ ثابت تبدیل کنیم، باید از المانهایی استفاده کنیم که بتوانند انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کنند و موقعی که ولتاژیکسوشده از مقدار V_M به مقدار صفر میل می کند، این المان، ذخیره کنندهٔ انرژی را به مصرف کننده بدهد. المانهایی که می توانند انرژی را در خود ذخیره کنند سلف و خازن می باشند. در توانهای کم از خازن ودر توانهای زیاد از سلف استفاده می شود. ضمن اینکه درتوانهای بالا ازیکسوکننده های چند فازه استفاده می شود.

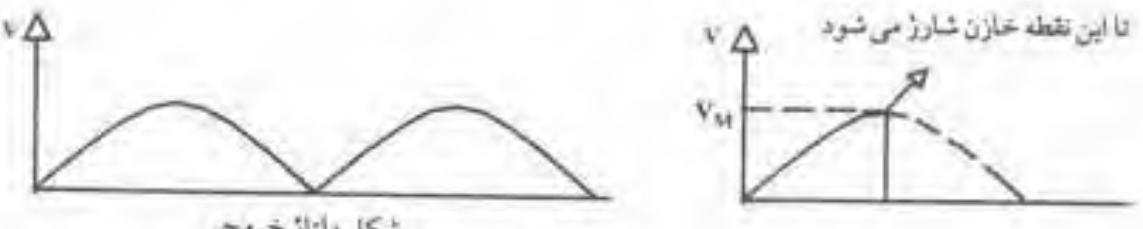
در مدارات الکترونیکی، برای ثابت کردن ولتاژ یکسو شده از سلف، کمتراستفاده می شود، زیرا سلف دارای حجم، وزن و قیمت زیادی می باشد. لذا از خازن که دارای حجم کم و ارزانتر است استفاده می شود. بنابراین دراینجا فقط صافی خازنی مورد بحث قرار می گیرد.

صافی خازنی ـ زمانی که خازن به عنوان صافی به کار می رود، به طور موازی با بارقرار می گیرد. شکل (۱۸ ـ ۴)



شکل (۱۸ـ۴)

چگونگی ثابت کردن ولتاژ، بدین صورت است که ابتدا از مقدار صفر تا ماکزیمم ولتاژ نیم سیکل مثبت، ولتاژ مطابق شکل (۱۹ ـ ۴) ـ در خازن ذخیره می گردد.

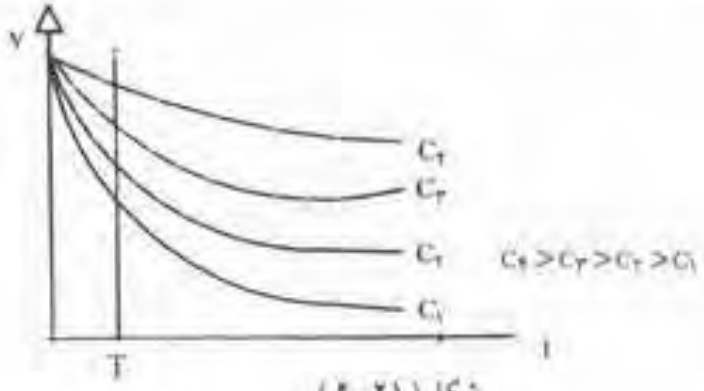


شکل (۱۹ـ۴)

زمانی که ولتاژ خروجی از مقدار V_M کمتر می شود، دیودهای یکسوکننده دربایاس معکوس قرار می گیرند. بنابراین ولتاژ دو سر بار از خازن تأمین می گردد. یا به عبارت دیگر خازن از طریق بار دشارژ می گردد. همانطور که می دانیم منحنی دشارژ خازن ـ مطابق شکل (۲۰ـ۴) ـ به صورت نمایی نزولی می باشد.

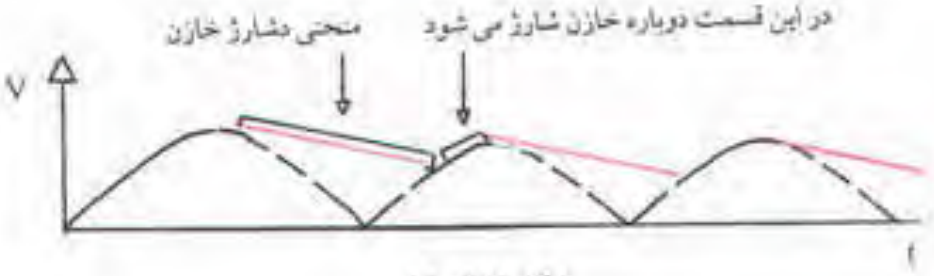
شکل (۲۰ـ۴)

شیب منحنی، بستگی به مقدار بار و ظرفیت خازن دارد. در شکل (۲۱ـ۴) منحنی دشارژ خازن، برای چهارنوع ظرفیّت خازن با بارمساوی، رسم شده است.



شکل (۲۱ـ۴)

همانطور که دیده می شود هر چه ظرفیّت خازن بزرگتر باشد، زمان دشارژ آن نیز دریک بار مساوی، بیشتر می شود. شکل (۲۲ ـ ۴) منحنی دشارژ خازن در دو سر بار را نشان می دهد.

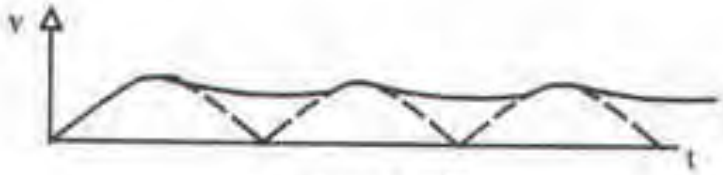


شکل (۲۲ـ۴)

شکل (۲۳ ـ ۴) منحنی دشارژ خازن را برای دو نوع خازن با ظرفیّت کم و زیاد در یک بارِمساوی، نشان می دهد.

بازای ظرفیت کمتر (a)

شکل (۲۳ـ۴)



بازای ظرفیت بیشتر(b)

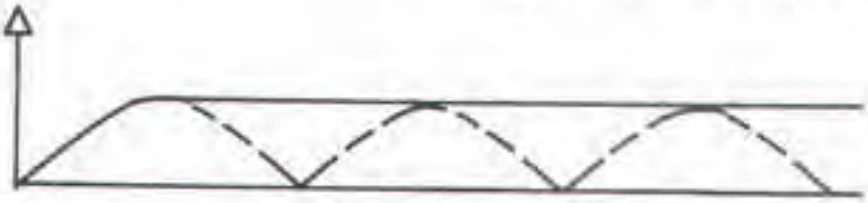
شکل (۲۴ ـ۴) منحنی ولتاژ خروجی را به ازای جریان خروجی کمتر و بیشتر برای یک ظرفیّت خازن، نشان می دهد.

بازای جریان کمتر (a)

شکل (۲۴ـ۴)

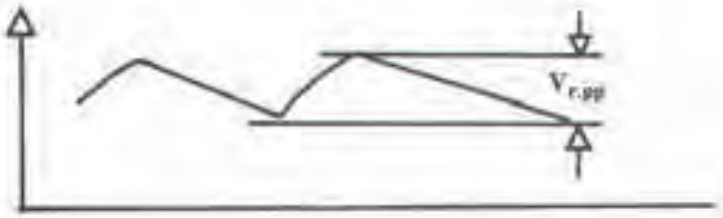
بازای جریان بیشتر (b)

اگر به خروجی یکسوکننده همراه باصافی خازنی، هیچ باری وصل نشود، ولتاژ خروجی به صورت شکل (۲۵ ـ۴) خواهد شد.



شکل (۲۵ـ۴)

به قسمتهایی که در شکل (۲۶ ـ ۴) نشان داده شده است ولتاژ ریپل[1] می گویند. دامنهٔ پیک تا پیک آن تا حدودی برای تمامی مدارائی که با ولتاژ dc کار می کنند، قابل قبول می باشد.



شکل (۲۶ـ۴)

ظرفیّت تقریبی خازن را ـ با توجّه به میزان ولتاژ ریپل قابل قبول ـ می توان ازرابطهٔ زیر بدست آورد.

برای یکسو کنندهٔ نیم موج $C = \frac{\text{جریان خروجی}}{\text{فرکانس موج یکسو شده} \times V_{r.pp}} = \frac{I_{out}}{۵۰ \times V_{r.pp}}$ (فاراد)

برای یکسوکنندهٔ تمام موج و پل $C = \frac{I_{out}}{۱۰۰ \times V_{r.pp}}$ (فاراد)

۵ ـ ۴ ـ مدارات چند برابر کنندهٔ ولتاژ[2]

با استفاده از دیود و خازن، می توان ضمن یکسوکردن ولتاژ متناوب، آن را چند برابر نیز نمود. کاربرد چند برابر کننده ها، در مواردی است که جریان زیاد مورد نیاز نباشد (حدود چند صد میکروآمپر). چند برابر کننده ها معمولاً در ولتاژهای بسیار بالا (حدود کیلو ولت) به کار می روند. مانند قسمت ولتاژ زیاد[3] تلویزیون، که در آنجا ولتاژی حدود ۲۵ کیلو ولت مورد نیاز می باشد. ابتدا ولتاژی حدود ۵ کیلو ولت را توسّط ترانسفورماتور ایجاد کرده، سپس آن را توسّط یک مدار پنج برابر کننده به مقدار حدود ۲۵ کیلو ولت می رسانند. مزایای این عمل، صرفه جویی در حجم و قیمت ترانسفورماتور افزایندهٔ ولتاژ می باشد؛ زیرا عایقکاری ترانسفورماتور ۲۵ کیلوولت مشکل است و در ضمن میدانهای

---

۱ ـ Ripple

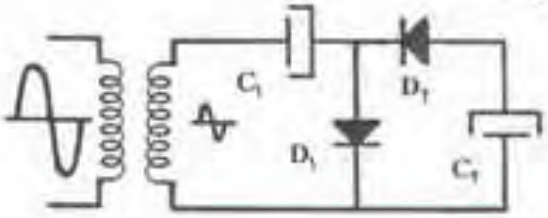
۲ ـ Voltage Multiplier Circuit

۳ ـ High Voltage (های ـ ولتاژ)

مغناطیسی زیادی را در اطراف خود تولید می نماید. ضمن اینکه ولتاژ معکوس دیودهای یکسوکننده در چند برابر کننده ها، نسبت به یکسوکننده ولتاژ زیاد ترانسفورماتور، کاهش می یابد.

اینک مدارات دو، سه وچهار برابر کننده، مورد بررسی قرار می گیرند.

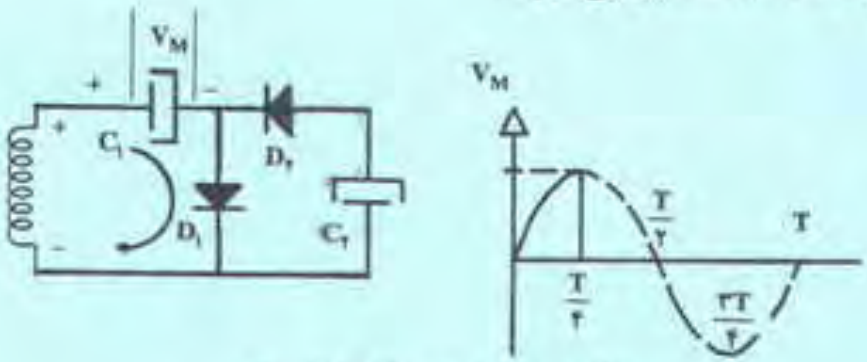
۱ـ۵ـ۴ـ مدارات دو برابر کنندهٔ ولتاژ : شکل (۲۷ـ۴) یک مدار دو برابر کنندهٔ ولتاژ نیم موج را نشان می دهد.



شکل (۲۷ـ۴) دوبرابر کننده ولتاژ

برای مطالعه آزاد

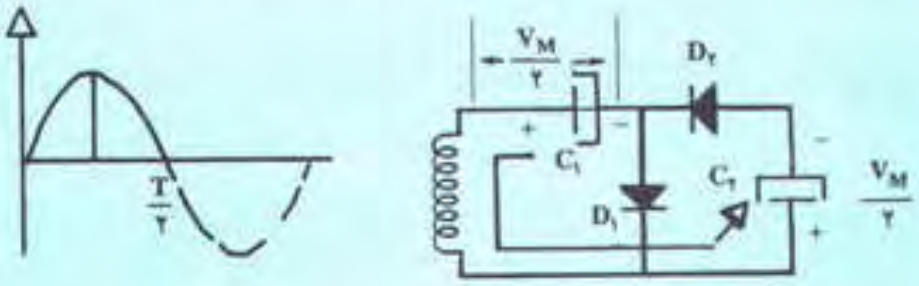
نحوه دو برابر شدن ولتاژ، به صورت جزء به جزء مورد بررسی قرار می گیرد. در لحظه صفر (زمانی که ولتاژ ثانویهٔ ترانسفورماتور صفر است) خازنها کاملاً دشارژ هستند. در مدّت $\frac{۱}{۴}$ سیکل مثبت، ولتاژ ثانویهٔ ترانسفورماتور به ماکزیمم می رسد و خازن $C_۱$ نیز از طریق دیود $D_۱$ (که در بایاس مستقیم قرار گرفته است) به اندازه ولتاژ ماکزیمم (V_M) ـ مطابق شکل (۲۸ـ۴) ـ شارژ می شود.



شکل (۲۸ـ۴) شارژ $C_۱$ از طریق $D_۱$

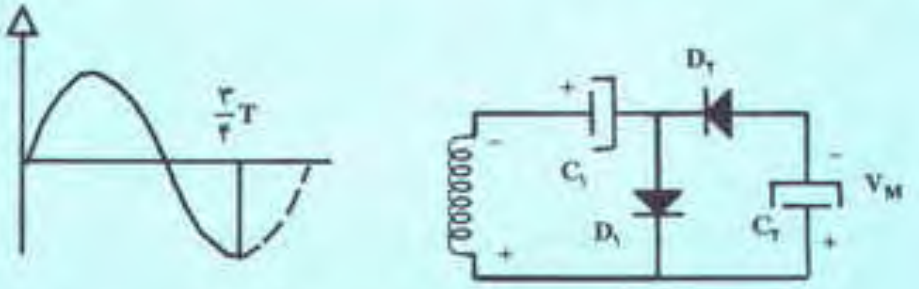
در مدت زمان $\frac{T}{۴}$ تا $\frac{T}{۲}$، ولتاژ ثانویهٔ ترانسفورماتور کاهش می یابد. در این لحظه دیود $D_۱$ در بایاس معکوس و دیود $D_۲$ در بایاس موافق قرار می گیرد تا اینکه در لحظه $\frac{T}{۲}$ مقدار آن به صفر می رسد. دراین حالت، ولتاژ ذخیره شده در خازن $C_۱$ از طریق دیود $D_۲$ در خازن $C_۲$ دشارژ می گردد. (دیود $D_۱$ در این زمان در بایاس مخالف می باشد زیرا به آند آن، ولتاژ منفی خازن وصل شده است) اگر دیودها را ایدآل فرض کنیم، ولتاژ خازن $C_۱$

که در خازن C_2 دشارژ شده است، به نصف تقلیل می یابد. شکل (۲۹ـ۴)



شکل (۲۹ـ۴) دشارژ C_1 در C_2 به اندازه $\frac{V_M}{2}$

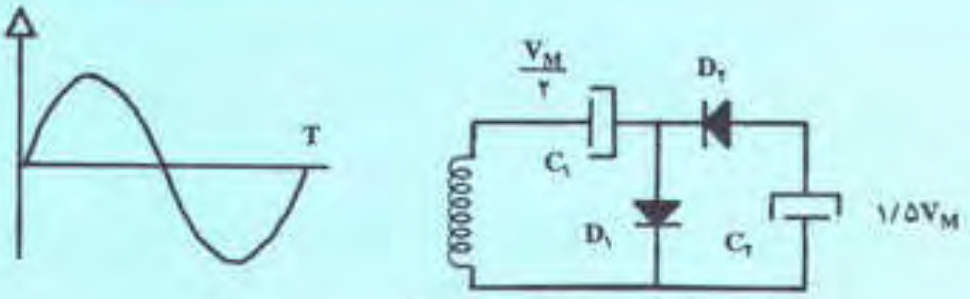
در مدت زمان $\frac{T}{2}$ تا $\frac{3}{4}T$ که ولتاژ ثانویه، منفی می باشد، ولتاژ ذخیره شده در خازن C_1 با ولتاژ ثانویهٔ ترانسفورماتور، دو سر خازن C_2 دشارژ شده و ولتاژ خازن C_2 را به اندازه V_M شارژ می کند. شکل (۳۰ ـ ۴)



شکل (۳۰ـ۴) شارژ C_1 به اندازه V_M

در مدت زمان $\frac{3}{4}T$ تا T که ولتاژ ثانویهٔ ترانسفورماتور از مقدار ماکزیمم منفی به صفر میل می کند هر دو دیود در بایاس معکوسند و ولتاژها به همین صورت ($\frac{T}{2}$ تا $\frac{3}{4}T$) باقی می مانند. در سیکل دوم، در زمان T تا $1\frac{1}{4}T$ مجدداً خازن C_1 از طریق دیود D_1 تا مقدار V_M شارژ می شود و در زمان $1\frac{1}{4}T$ تا $1\frac{1}{2}T$ دو دیود D_1 و D_2 در بایاس معکوس قرار می گیرند؛ بنابراین ولتاژ C_1 و C_2 به همان صورت قبلی (V_M) باقی می مانند. در مدت زمان $1\frac{1}{2}T$ تا $1\frac{3}{4}T$ دو ولتاژ C_1 و ثانویهٔ ترانسفورماتور با یکدیگر جمع شده، در دو سر خازن C_2 قرار می گیرند. در این حالت، ولتاژ C_1 نصف شده و ولتاژ C_2 به اندازه $1/5\ V_M$ می رسد (چون دو ولتاژ باهم موازی می شوند و خازن C_1 دشارژ شده تا پتانسیل دو سر C_2 با پتانسیل ثانویهٔ ترانسفورماتور و C_1 با هم برابر گردند). در مدت زمان $1\frac{3}{4}T$ تا $2T$، دو دیود در بایاس معکوسند و ولتاژها به همان مقدار باقی می مانند. شکل (۳۱ـ۴)

درسیکل سوم، درزمان صفر تا $\frac{T}{4}$ خازن C_1، مجدداً به اندازه V_M شارژ می شود و



شکل (۳۱ـ۴)

در زمان $\frac{T}{4}$ تا $\frac{T}{2}$، دو دیود در بایاس معکوسند و قطع می‌باشند. در زمان $\frac{T}{2}$ تا $\frac{3}{4}T$ ولتاژ ثانویهٔ ترانسفورماتوربا ولتاژ خازن جمع شده ($2V_M$) ودردوسرخازن C_2 قرارمی گیرد، بنابراین خازن C_1 دشارژ شده تا دو ولتاژ خازن C_2 وجمع ولتاژهای C_1 و ثانویهٔ ترانسفورماتور، با هم برابر گردند یا $\left(\frac{(V_{C_1}+V_{MT})+V_{C_2}}{2}\right)$، $\frac{2V_M+1/5V_M}{2}$ می‌شود. لذا ولتاژ آن به $1/75\,V_M$ می‌رسد. در زمان $\frac{3}{4}T$ تا T هردو دیود در بایاس معکوس هستند و ولتاژهای خازن به همین صورت باقی می مانند. به همین ترتیب، بعد از چندین سیکل ولتاژ C_2 به اندازه $2V_M$ می رسد. در مدارات چند برابر کننده، معمولاً فرکانس ولتاژ متناوب را زیاد می گیرند.

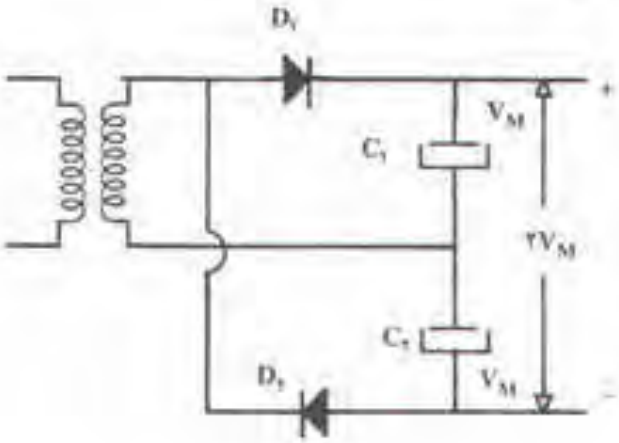
اگر جریان مصرف کننده کم باشد، مقدار ولتاژ دشارژ شده در خازن C_2 نیز کمتراست. ولتاژ دو سر خازن C_2، مانند ولتاژ دو سر یکسوکنندهٔ نیم موج با فیلتر خازنی می‌باشد. شکل (۳۲ـ۴) شکل موج خروجی را به ازای جریان کم و زیاد نشان می دهد. گرچه شکل موج خروجی بستگی به ظرفیّت خازنها نیز دارد.

a ـ به ازای جریان خروجی کم

b ـ به ازای جریان خروجی زیاد

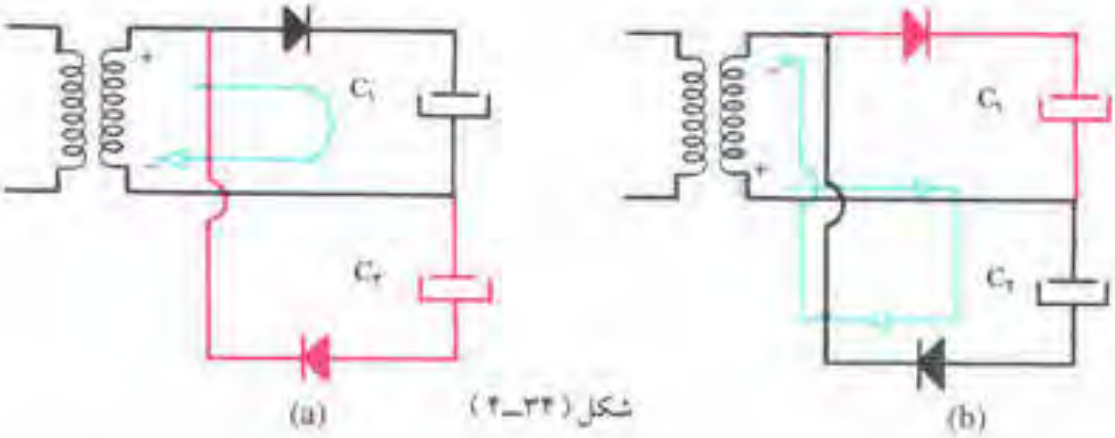
شکل (۳۲ـ۴)

نوع دیگر مدار دو برابر کنندهٔ ولتاژ، طبق شکل (۳۳ـ۴) می باشد. این مدار، دو برابر کنندهٔ ولتاژ تمام موج است.



شکل (۳۳ـ۴)

طرز کار مدار، بدین صورت است که در مدت نیم سیکل مثبت ولتاژ ثانویهٔ ترانسفورماتور، دیود D_1 دربایاس مستقیم قرار گرفته، هادی می باشد. لذا خازن C_1 تا مقدار حداکثر (V_M) شارژ می شود. دراین حالت دیود D_2 دربایاس معکوس قرار گرفته، قطع می باشد. شکل (a ـ ۳۴ـ۴)

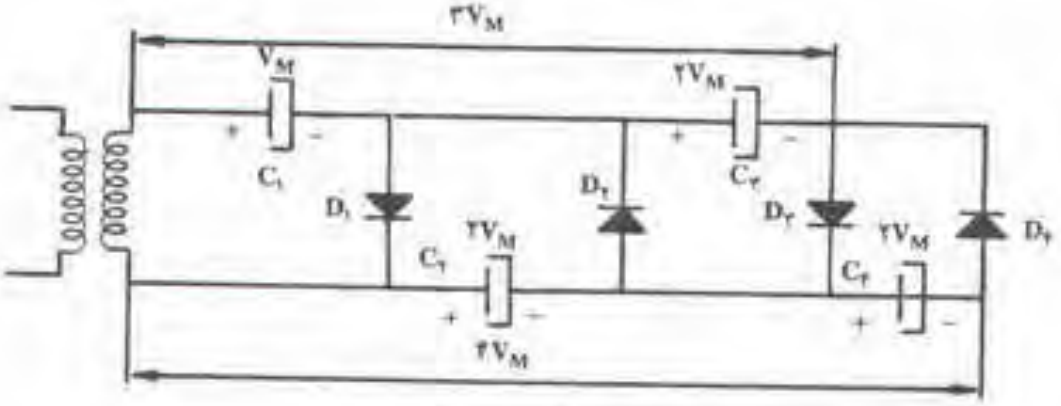


شکل (۳۴ـ۴)

در مدت نیم سیکل منفی ولتاژ ثانویهٔ ترانسفورماتور، دیود D_2 در بایاس مستقیم بوده، خازن C_2 تا مقدار حداکثر ولتاژ (V_M) شارژ می شود. در این حالت دیود D_1 در بایاس معکوس بوده، قطع می باشد شکل (b ـ ۳۴ـ۴). اگر باری به مدار وصل نشود، مقدار ولتاژ خروجی برابر $2V_M$ ثابت می ماند و ولتاژ دو سر هر خازن V_M می باشد و هر یک، فقط در مدت نیم سیکل شارژ می شوند. بنابراین شکل موج خروجی ـ که در خازنها شارژ شده ـ به صورت تمام موج، خواهد بود. (یا به عبارت دیگر مدار، توسّط ولتاژ

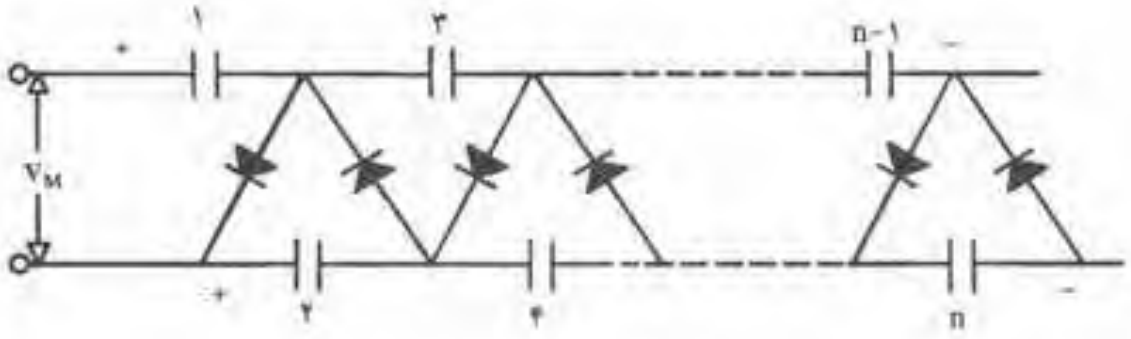
یکسوشده تمام موج تغذیه می گردد). اشکال عمدهٔ این مدار این است که دو خازن سری شده و مقدار ظرفیّت کل، نصف می شود. مقدار حداکثر ولتاژی که دو سر هردیود دربایاس معکوس قرار می گیرد، برابر $2V_M$ می باشد.

۲ـ۵ـ۴ـ مدارات سه وچهار برابر کنندهٔ ولتاژ: یک مدار سه و چهار برابر کننده ولتاژ، در شکل (۳۵ـ۴) نشان داده شده است. در حقیقت این مدار، یک مدار دو برابر کنندهٔ ولتاژ است که در صفحات پیش مورد بررسی قرار گرفت. با این تفاوت که به ازای هر یک برابر افزایش ولتاژ، یک خازن و یک دیود به آن اضافه شده است. این مدار می تواند با اضافه شدن متوالی دیودها و خازنها به عنوان یک مدار پنج و شش و ... برابر کننده، به کار آید.



شکل (۳۵ـ۴)

به طور ساده و خلاصه طرز کار مدار با توجه به شکل (۳۵ـ۴) بدین صورت می باشد که در مدّت نیم سیکل مثبت ولتاژ ثانویهٔ ترانسفورماتور، خازن C_1 از طریق دیود D_1 به اندازه ولتاژماکزیمم V_M شارژ می شود. خازن C_2 در مدّت نیم سیکل منفی واز طریق دیود D_2 به اندازه $2V_M$ شارژ می گردد. (بعد از چند سیکل) در مدّت نیم سیکل مثبت بعدی، خازن C_3 از طریق دیود D_3 به اندازه $2V_M$ شارژ می شود (بعد از چند سیکل) و در مدّت نیم سیکل منفی خازن C_2 از طریق دیود D_4 به اندازه $2V_M$ شارژ می گردد. (در این حالت ولتاژ ثانویهٔ ترانسفورماتور و ولتاژ خازن C_1 و C_3 با هم جمع شده و به اندازه $4V_M$ می شود که بین دو خازن C_2 و C_4 تقسیم می گردد). بنابراین در این مدار ولتاژ هر خازن به اندازه $2V_M$ و ولتاژ معکوس هر دیود به اندازه $2V_M$ می باشد. شکل (۳۶ـ۴)، یک مدار n برابر کننده را نشان می دهد. خازنهای ردیف بالا، نمایشگر اعداد فرد مقدار شارژ نسبت به ابتدای مدار و خازنهای ردیف پایین، نمایشگر اعداد زوج مقدار شارژ نسبت به ابتدای مدار می باشد.

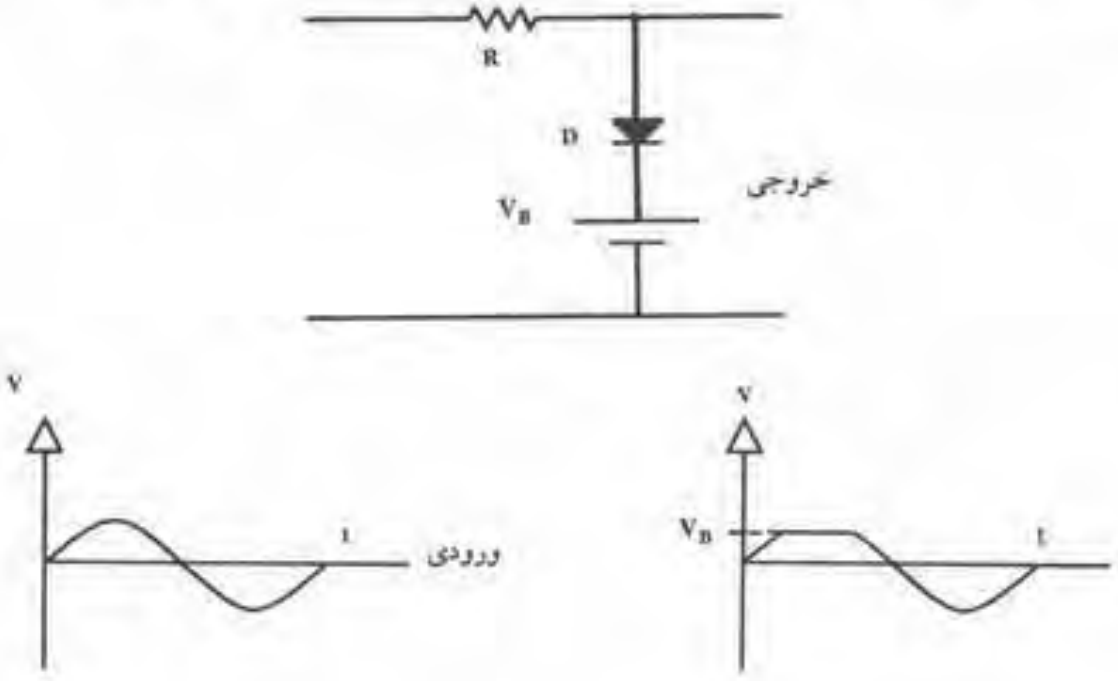


شکل (۳۶ـ۴) مدار n برابر کنندهٔ ولتاژ

۶ ـ ۴ ـ برش دهنده ها[1]

در بسیاری از موارد، از جمله در دیجیتال و کـامپیوتر لازم می شود که دامنهٔ سیگنالها از قسمت مـثبت یا منفی و یا هر دو، به اندازه معیّنی محـدود گردد. مدارات برش دهنده ها چنین عملی را انجام می دهند.

۱ ـ ۶ ـ ۴ ـ مدار برش دهندهٔ مثبت : مدار برش دهندهٔ مثبت، قـادر است که قسمت مثبت سیکلها را به هر مـقدار که لازم باشد، مـحدود کند. شکل (۳۷ـ۴) یک مدار برش دهندهٔ مثبت را نشان می دهد. برای سادگی کار، دیود را ایدآل در نظر می گیریم.



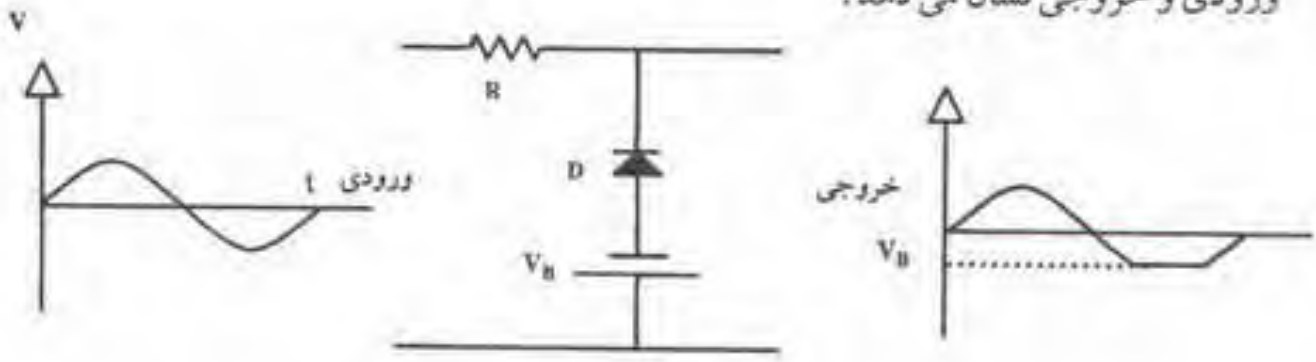
شکل (۳۷ـ۴)

---

۱ ـ Clipper

اگر سیگنال ورودی، کوچکتر از V_B باشد دیود در بایاس معکوس قرار گرفته و قطع است. لذا ولتاژ خروجی، عین ولتاژ ورودی می باشد. اگر ولتاژ ورودی از V_B بیشتر شد دیود هادی شده و ولتاژ خروجی، به اندازه ولتاژ باتری ثابت می ماند (هدایت دیود، به منزله یک کلید بسته است، زمانی که کلید بسته شود ولتاژ باتری با خروجی موازی می گردد.) در مدّت نیم سیکل منفی دیود قطع بوده، ولتاژ خروجی همان ولتاژ ورودی می باشد.

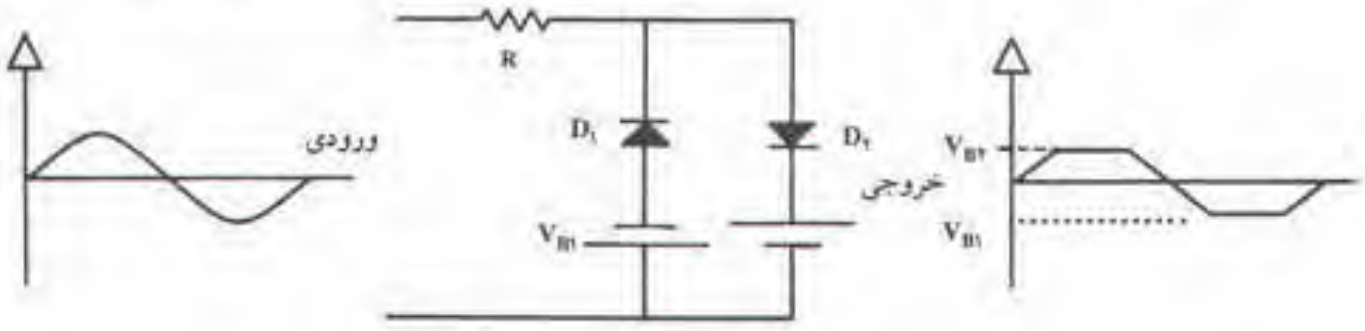
۲ـ۶ـ۴ـ مدار برش دهندهٔ منفی : شکل (۳۸ ـ ۴) این مدار را همراه با شکل موج ورودی و خروجی نشان می دهد.



شکل (۳۸ـ۴)

در نیم سیکل مثبت دیود قطع می باشد. بنابراین ولتاژ خروجی از نظر مقدار و جهت، عین ولتاژ ورودی است. در نیم سیکل منفی، زمانی که ولتاژ منفی از V_B بیشتر می شود ولتاژ آند دیود، مثبت تر از کاتد آن شده، دیود هادی می شود (کلید بسته می شود) و ولتاژ باتری با خروجی موازی می گردد. لذا ولتاژ خروجی به اندازه V_B ثابت می ماند تا اینکه ولتاژ منفی از مقدار V_B کمتر گردد. به محض اینکه ولتاژ منفی از V_B کمتر شد، دیود، قطع شده و ولتاژ خروجی مجدّداً عین ولتاژ ورودی می شود.

۳ـ۶ـ۴ـ مدار برش دهندهٔ دو طرفه : اگر یک مدار برش دهنده مثبت و یک برش دهنده منفی را به طور موازی با یکدیگر ببندیم، می توانیم سیگنال را از دو طرف برش



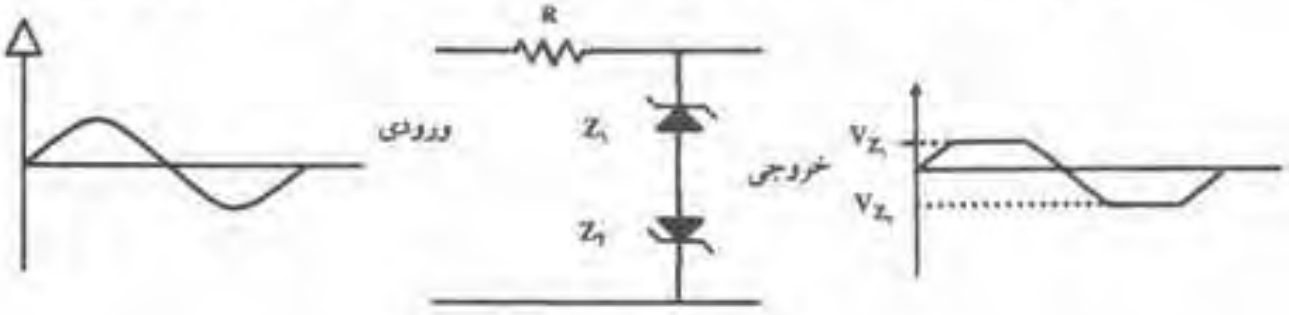
شکل (۳۹ـ۴)

دهیم. شکل (۳۹ـ ۴) یک مدار برش دهندهٔ دو طـرفه را همراه با ولتـاژ ورودی و خروجی نشان می دهد.

مـدار برش دهندهٔ دوطرفه را می تـوانیم با استفـاده از دو دیود زنر نیز انجـام دهیم. شکل(۴۰ـ۴) یک برش دهندهٔ دو طرفه با استفاده از دیود زنر را نشان می دهد.

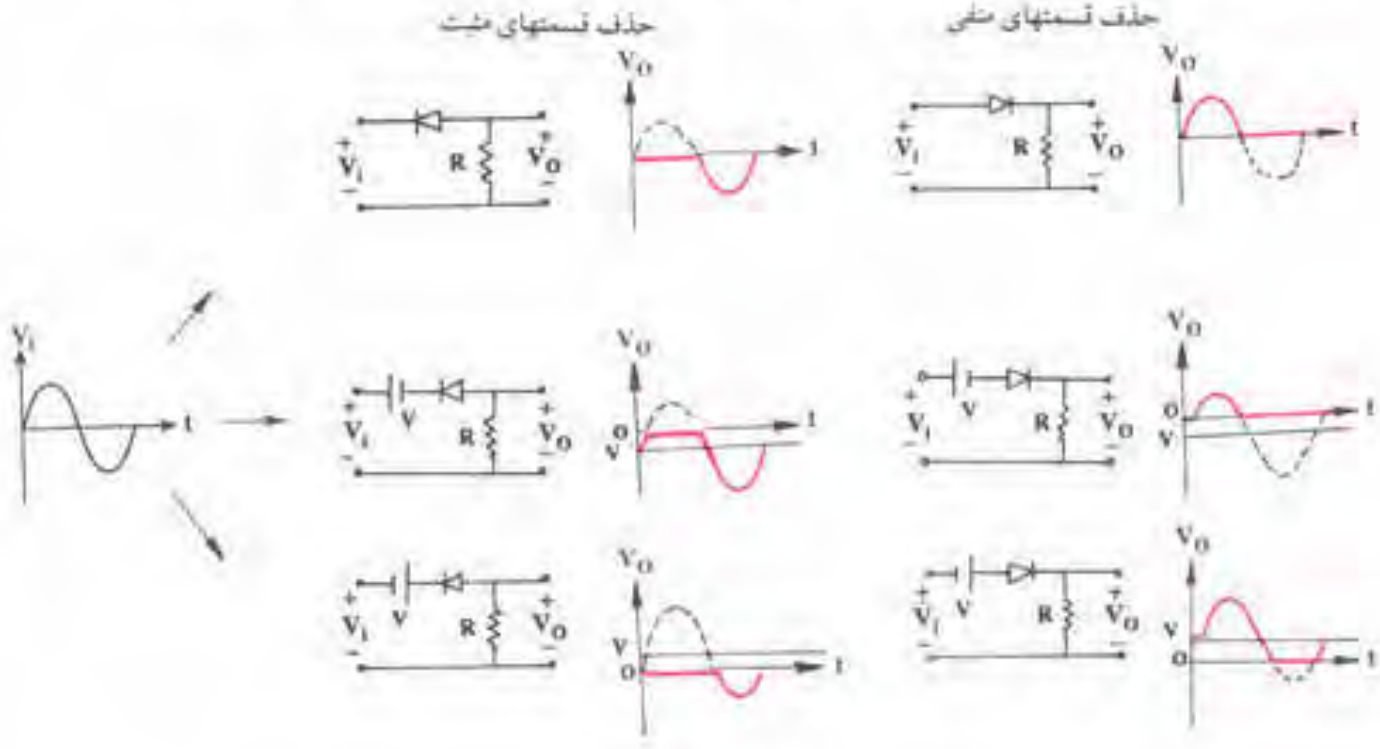
تمرین :طرز کار مدار شکل (۴۰ـ۴) را توضیح دهید.

چنانچـه در هر یک از مدارات برش دهنده (مـثبت و منفی) جـهت باتری ویا دیود را

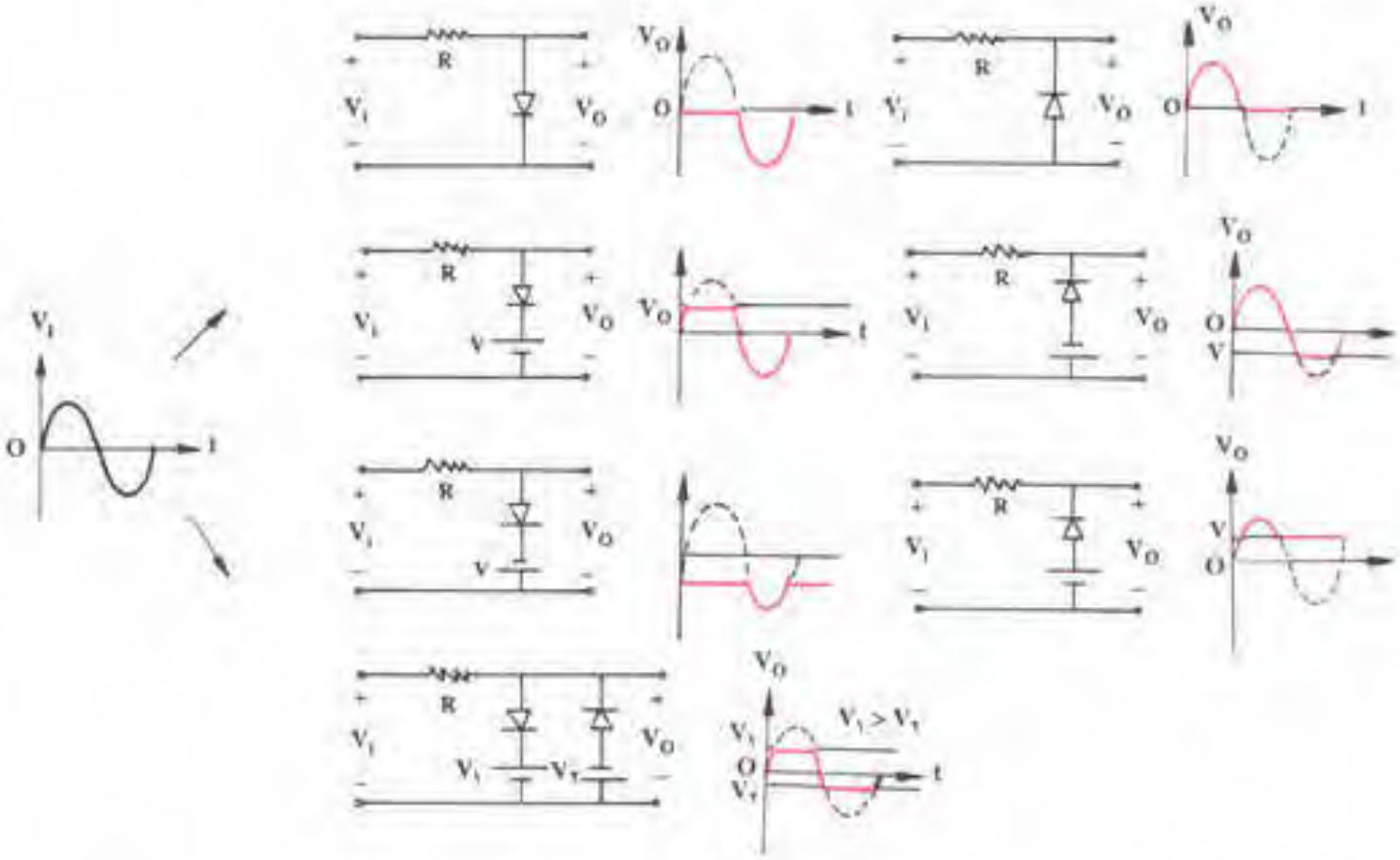


شکل (۴۰ـ۴)

عوض کنیم، یا اینکه خروجی را از مقاومت سری شده بگیریم، شکل موج تمامی حالات با یکدیگر، متفاوت است. در شکل(bوa ـ ۴۱ـ ۴) تمامی حالات ممکنه رسم شده است.



شکل (a ـ ۴۱ـ ۴)



شکل (h ـ ۴۱ ـ ۴)

تمرین : طرز کار تمامی مدارات فوق را بنویسید.

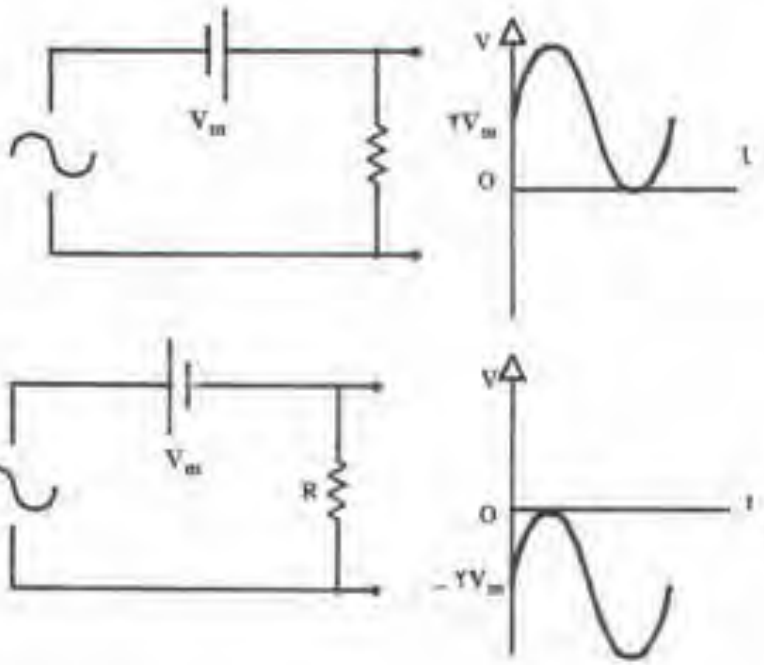
۷ ـ ۴ ـ مهارکننده ها[1]

در مدار مهار کننده، تنها کاری که انجـام می گیرد، اضافه شدن مؤلفه dc به سیگنال است. عمل مهارکنندگی در شکل (۴۲ ـ ۴) نشان داده شده است.

شکل (۴۲ ـ ۴)

۱ ـ Clampers

در حقیقت، مهارکننده، فقط روی سیگنال یک تغییر مکان عمودی می دهد. این تغییر مکان می تواند به سمت بالای خط صفر (مثبت) و یا زیر خط صفر (منفی) باشد که به ترتیب مهار کنندهٔ مثبت و منفی نام دارند. شکل (۴۳ـ ۴) مدار یک مهار کننده مثبت و منفی را نشان می دهد .

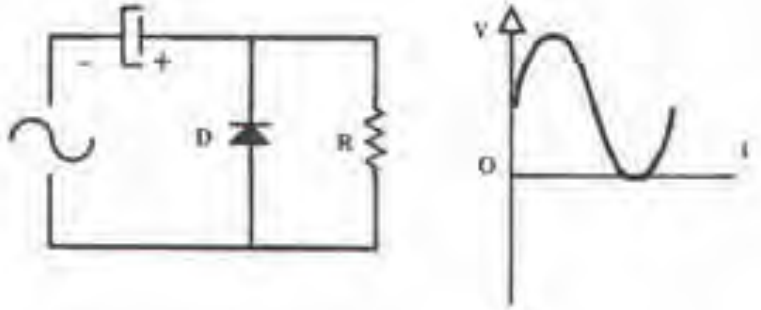


a : مهارکننده مثبت

b : مهار کننده منفی

شکل (۴۳ـ۴)

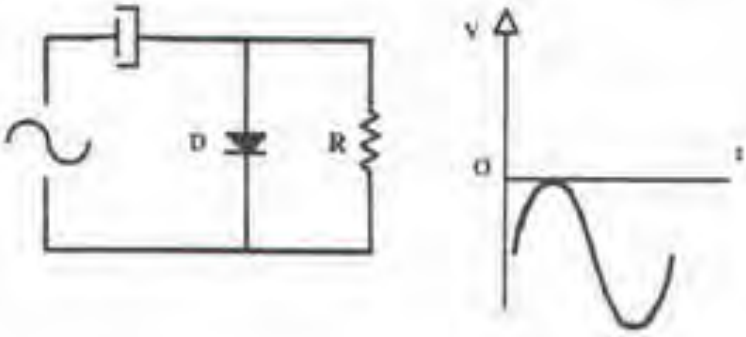
اما در عمل در مهارکننده ها از باتری استفاده نمی شود، بلکه به جای آن خازن و دیود مورد استفاده قرار می گیرد . شکل (۴۴ـ۴) یک مهار کنندهٔ مثبت را با استفاده از خازن نشان می دهد .



شکل (۴۴ـ۴)

به طور ایدآل و ساده، طرز کار مدار به این صورت است که در مدّت نیم سیکل منفی، خازن C از طریق دیود D تا مقدار V_M شارژ می شود (دیود D در این مدّت اتّصال کوتاه است) قطبهای ولتاژ شارژ شده در شکل نشان داده شده است. در مدّت نیم سیکل مثبت، دیود D قطع می باشد و ولتاژ سیگنال با ولتاژ خازن جمع می شود (ولتاژ شارژ شده در خازن در اینجا به منزلهٔ یک باتری است) و شکل موج به صورت بالا در می آید.

$(V_{dc} + V_{ac})$. شکل (۴۵ـ۴) یک مدار مهارکننده منفی را نشان می دهد .



شکل (۴۵ـ۴)

در مدار مهـار کننده منفی ، خازن در نیم سیکل مثبت ، شـارژ می شود ودر نیم سیکل منفی به منزلهٔ یک باتری مـحسـوب می شود . در صـورتی که بخـواهیم سیگنالهـا به اندازه ۷ ولت بالاتر یا پایین تر از مبدأ (صفر ولت) باشنـد ، کافی است که یک منبع ثابتی با مـقدار ۷ ولت با دیود سری کنیم .

تمرین : طرز کارمدارهای فوق را بنویسید .

۸ ـ ۴ ـ نامگذاری دیودها

برای نامگذاری دیودها ، سه روش مـهم وجود دارد . هرچند ، برخی از کارخـانجات سازنده در گوشه و کنار دنیا از روشهای مـخصوصی برای نامگذاری استفاده می نمایند . این سه روش عبارتند از :

۱ ـ روش ژاپنی

۲ ـ روش اروپایی

۳ ـ روش آمریکایی

در ذیل چگونگی نامگذاری هریک از سه روش فوق را توضیح می دهیم :

۱ ـ ۸ ـ ۴ ـ روش ژاپنی : دراین روش نامگذاری از عدد ۱ و حرف S که به دنبال آن می آید استـفاده می شود و به دنبـال آن تعداد ی شمـاره خواهد آمد کـه با مراجعـه به جدول می توان مشخصات الکتریکی آن را به دست آورد . در این روش ، جنس و نوع دیود مشخص نمی باشد . به عنوان مـثال دیود ۱S۳۰۱۰A دیود زنر است (در موارد زیادی برای دیودهای زنر حرف A را در انتهـای شمـاره ها می آورند) و دیود ۱S۳۱۰ یک دیود معـمولی و دیود ۱S۲۰۴۹ دیود وراکتور می باشد .

۲ـ۸ـ۴ـ**روش اروپایی** : در روش اروپایی ، تا سال ۱۹۶۰ تمامی دیودها را با حروف OA با تعدادی شماره به دنبال آن مشخص می کردند که با مراجعه به جدول می توانستیم مشخصات الکتریکی آن را به دست آوریم. مانند دیود OA۳۴ . امّا از سال ۱۹۶۰ به بعد این روش نامگذاری تغییر کرد. نحوهٔ تغییر بدین صورت بود: دیودهایی که بیشتر در مدارات رادیو و تلویزیون به کار می روند، با دو حرف و سه شماره مشخص می شوند و دیودهایی که کاربرد آنها در مدارات مخصوصی می باشد با سه حرف و دو شماره معیّن می گردند. در ذیل روش نامگذاری دو حرفی و سه شماره ای خواهد آمد.

حرف اوّل، جنس نیمه هادی به کار رفته در دیود را مشخّص می کند، اگر دیود از جنس ژرمانیم بود با حرف A و اگر از جنس سیلیسیم باشد با حرف B مشخص می نمایند.

حرف دوم، یکی از حروف زیر می باشد که نوع دیود را مشخص می کند.

A ـ دیود معمولی یکسو کننده

B ـ دیود واراکتور

Y ـ دیود یکسو کنندهٔ قدرت

Z ـ دیود زنر

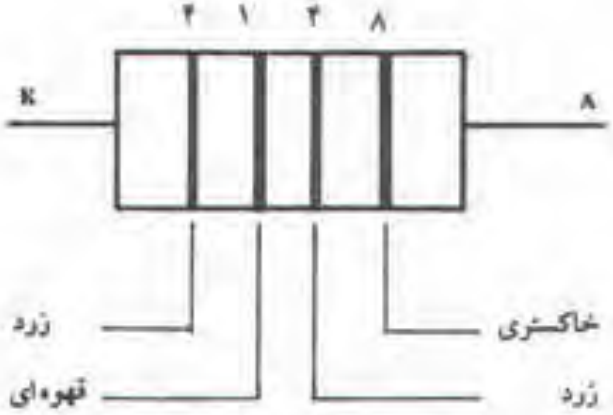
بعد از حروف ، شماره هایی آورده می شود که می توان با مراجعه به جدول، مشخّصات الکتریکی آن را به دست آورد. در ذیل تعدادی از دیودها که به این روش نامگذاری شده اند، آورده شده است.

دیود معمولی یکسو کنندهٔ ژرمانیمی	AA ۱۱۶
دیود معمولی یکسو کنندهٔ سیلیسیومی	BA ۳۱۶
دیود یکسو کنندهٔ قدرت	BY ۱۲۷
دیود زنر	BZ ۱۰۰

لازم به تذکر است که در اکثر مواقع در مورد نامگذاری دیود زنر، ولتاژ زنر را نیز روی آن قید می نمایند.

۳ـ۸ـ۴ـ**روش آمریکایی** : در این روش از عدد ۱ و حرف N و تعدادی شماره که به دنبال آن می آید، استفاده می شود. دراین روش جنس و نوع دیود مشخص نمی باشد. مانند ۱N۴۰۰۶ که یک دیود یکسو کننده است.

با توجه به شماره ای که بعد از ۱N می آید می توان با مراجعه به جدول مربوطه، مشخصات الکتریکی و نوع دیود را تعیین کرد. بعضی مواقع نیز به جای ارقام بعد از ۱N، از کدهای رنگی استفاده می شود. زمانی که از کد رنگی استفاده می شود از چاپ حرف و عدد ۱N صرف نظر می گردد. کدهای رنگی مانند مقاومتها می باشد با این تفاوت که شمارهٔ رنگها به دنبال هم قرار می گیرند. مثلاً شکل (۴۶ـ۴) دیود ۱N۴۱۴۸ را مشخص می کند.

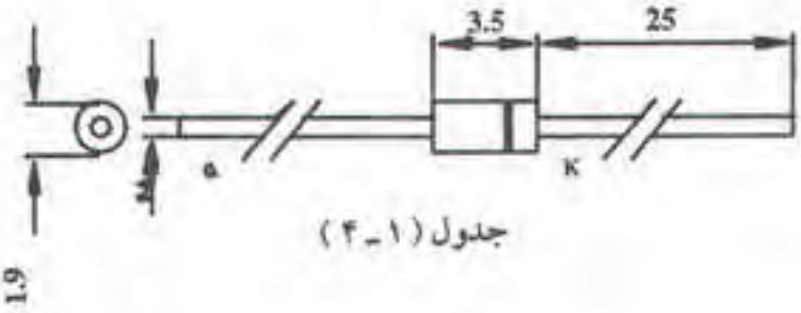


شکل (۴۶ـ۴) دیود ۱N ۴۱۴۸

۹ ـ ۴ ـ به دست آوردن مقادیر حد از روی جدول

برای به دست آوردن مشخصه های الکتریکی دیود، باید با توجه به شمارهٔ دیود، به جدولهای مربوط مراجعه نمود. یکی از این جدولها که حاوی مشخصات دیودهاست و در بازار به فراوانی یافت می شود، کتاب Semiconductor Hand book می باشد. دراین کتاب، جنس دیود، نام شرکت سازنده، کاربرد و شکل ظاهری دیود آورده شده است. در ضمن انواع دیودهای معمولی با نامگذاری های مختلف و دیودهای زنر واراکتور نیز آمده است. در جدول (۱ـ۴) چگونگی استخراج اطلاعات و مشخصات الکتریکی آمده است. تعدادی از اطلاعات، که در این جدول آمده است، در کارهای معمولی کاربرد ندارند. در جدول (۲ـ۴) کاربرد انواع دیودها با توجه به شمارهٔ کاربرد در جدول (۲ـ۴) آمده است.

TYPE
Manufacturer
Germanium Silicon
V_R V
I_F mA
I_{FRM} mA
T_j °C
R_{thj-a} °C/W
I_F at V_F
C_D at V_R
t_{rr} from I_F to V_R at R_L
USE
CASE
۱N۴۱۴۸ شماره دیود
Ph
S
۷۵ ۱۵۰ ۴۵۰ ۲۰۰ ۱۰ ۱ ۲ ۰ ۴n ۱۰ ۶ ۱۰۰ ۷ ۲۷
نام کارخانه سازنده
جنس دیود
سیلیسیم S
ژرمانیم G
ماکزیمم ولتاژ معکوس مجاز
مقدار متوسط جریان مجاز
مقدار ماکزیمم جریان مجاز تکراری
ماکزیمم درجه حرارت قابل تحمل محل پیوند PN
مقاومت حرارتی دیود از محل پیوند PN به محیط
به ازای عبور این جریان از دیود
افت ولتاژ دوسر دیود بوجود می آید
ظرفیت خازن محل اتصال PN به ازای
این مقدار ولتاژ معکوس
زمان بازیابی دیود
جریان عبوری از مدار به ازای ↑
ولتاژ معکوس و ↑
مقاومت بار و ↑
کاربرد(مراجعه به جدول ۲-۴)
شکل ظاهری و ابعاد دیود که در ذیل همین صفحات باتوجه به شماره ای که قید شده است رسم شده اند



جدول (۱ ـ ۴)

« کاربرد انواع دیودها » USE

شماره	شرح
۱	آشکار کنندهٔ نسبی (FM)
۲	کاربرد در مدارات لاجیک
۳	آشکار کنندهٔ ویدیو
۴	تثبیت کننده
۵	کاربرد در سوییچ (کلید)
۶	کاربرد در سیگنالهای ضعیف
۷	کاربرد درسوییچ با سرعت زیاد
۸	یکسو کنندهٔ معمولی
۹	ولتاژ زیاد
۱۰	کاربرد در تلویزیون
۱۱	کاربرد در فرکانسهای زیاد

جدول (۲ ـ ۴)

پرسش

۱ ـ یکسوسازی را تعریف کنید وانواع آن را نام ببرید.

۲ ـ یکسوسازی نیم موج را با رسم شکل و شکل موجهای ورودی و خروجی، توضیح دهید.

۳ ـ حداکثر ولتاژ معکوس دوسردیود یکسوسازنیم موج، چقدر است؟

۴ ـ یکسوساز تمام موج را توضیح دهید. شکل مدار و شکل موجهای ورودی و خروجی آن را رسم کنید.

۵ ـ رابطهٔ حداکثر ولتاژ معکوس دیود در یکسو کنندهٔ تمام موج را بنویسید.

۶ ـ یکسوساز پل را توضیح دهید وآن را با یکسوکننده های تمام موج مقایسه کنید.

۷ ـ صافی (فیلتر) راتعریف کنید و اثرات آن را در یکسوکننده های نیم موج، تمام موج و پل با هم مقایسه کنید.

۸ ـ اصول کار چند برابر کننده های ولتاژ را توضیح دهید.

۹ ـ یک مدار ۷ برابر کننده ولتاژ رسم کنید و در باره آن توضیح دهید.

۱۰ ـ کاربرد چند برابر کننده های ولتاژ را نام ببرید.

۱۱ ـ اصول کار مدارات محدود کننده را توضیح دهید.

۱۲ ـ کاربرد مدارات قیچی کننده را بنویسید.

۱۳ ـ برش دهنده های مثبت و منفی و دو طرفه را با رسم شکل توضیح دهید.

۱۴ ـ روشهای نام گذاری دیود را بنویسید.

۱۵ ـ طرز استفاده از کاتالوگ و جدولهای مربوط به دیودها را با ذکر مثال توضیح دهید.

۱۶ ـ یک مدار دو برابر کننده ولتاژ را رسم کرده و ولتاژ روی خازن خروجی را در سه تناوب کامل بدست آورده و جدول زیر را پر کنید.

زمان تناوب / وضعیت المانها	۰	$\frac{۱}{۴}T$	$\frac{۱}{۲}T$	$\frac{۳}{۴}T$	T	$۱\frac{۱}{۴}T$	------
$D_۱$							------
$D_۲$							------
$V_{C_۱}$							------
$V_{C_۲}$							------

فصل پنجم

ترانزیستور

هدفهای رفتاری : فراگیر در پایان این فصل خواهد توانست :

۱ـ اصول کار لامپهای دیود و تریود را بطور مختصر توضیح دهد .

۲ـ ترانزیستور را معرّفی نماید .

۳ـ برتریهای ترانزیستور بر لامپهای الکترونی را نام ببرد .

۴ـ ساختمان ترانزیستور را توضیح دهد .

۵ـ نماد مداری ترانزیستور را شرح دهد .

۶ـ خواص اتّصال PNP و NPN را بنویسد .

۷ـ بایاسینگ ترانزیستور را تشریح کند .

۸ـ چگونگی تقویت در ترانزیستور را توضیح دهد .

۹ـ آرایشهای ترانزیستور را نام ببرد .

۱۰ـ جهت جریان در ترانزیستور را توضیح دهد .

۱۱ـ ولتاژها و جریانهای ترانزیستور را نامگذاری کند .

۱۲ـ منحنی مشخّصه ورودی ، انتقالی و خروجی را شرح دهد .

۱۳ـ ولتاژها و جریانهای مورد نیاز ترانزیستور را محاسبه کند .

۱۴ـ نقطهٔ کار را تعریف کند و چگونگی انتخاب آن را توضیح دهد .

۱۵ـ خط بار را تعریف کند و نحوه محاسبهٔ آن را شرح دهد .

۱۶ـ رابطهٔ بین جریانها و ولتاژها را در ترانزیستور بنویسد و توضیح دهد .

۱۷ـ α و β و γ و روابط حاصل از آنها را بنویسد و شرح دهد .

۱۸ـ تغذیهٔ مستقیم ، اتوماتیک و سرخود را تشریح کند .

۱۹ـ مقاومتهای بایاس را با رسم شکل در هر سه نوع بایاسینگ محاسبه نماید .

۲۰ـ ضریب پایداری حرارتی را تعریف کند .

۲۱ ـ ضریب پایداری حرارتی مدارهای با تغذیهٔ مستقیم ، اتوماتیک و سرخود را به دست آورد وباهم مقایسه نماید .

۲۲ ـ مقادیر حد را در ترانزیستور نام ببرد .

۲۳ ـ طریقهٔ نامگذاری ترانزیستور را توضیح دهد .

۲۴ ـ طرز استفاده از جدول را برای به دست آوردن مقادیر حد توضیح دهد .

۱ ـ ۵ ـ تاریخچهٔ اختراع ترانزیستور

در سالهای ۱۹۰۴ تا ۱۹۴۷ لامپها تنها وسایل الکترونیکی بودند که برای تقویت ، مورد استفاده قرار می گرفتند . در سال ۱۹۰۶ لامپ سه قطبی توسّط لی دی فورست[۱] ساخته شد و در سال ۱۹۳۰ لامپهای چهار قطبی (تترود) و پنج قطبی (پنتود) نیز ساخته شدند . در سالهای بعد ، صنعت الکترونیک به عنوان یک صنعت اصلی و مهم با قابلیّت توسعه بسیار ، مورد توجه قرار گرفت . در ۲۳ دسامبر ۱۹۴۷ صنعت الکترونیک به موفقیّت جدیدی دست یافت . در بعد از ظهر این روز والتربراتین[۲] و جان باردین[۳] عمل تقویت سیگنال را توسّط اولین ترانزیستوری که در لابراتوار کمپانی بل ، طراحی و ساخته شده بود ، انجام دادند . این ترانزیستور در شکل (۱ـ ۵) نشان داده شده است .

شکل (۱ـ ۵)اولین ترانزیستور ساخته شده در سال ۱۹۴۷

۱ـ Lee de forest ۲ـ Walter H. Brattain ۳ـ John Bardeen

۲ـ۵ ـ برتریهای ترانزیستور بر لامپهای الکترونی

بعد از اختراع ترانزیستور ، برتریهای این المان نسبت به لامپهای الکترونی ، به‌زودی آشکار گشت . به‌طوری که رادیو و تلویزیون و همچنین مدارات الکترونیکی ترانزیستوری ، بلافاصله ساخته شدند . در زیر به برخی از برتریهای ترانزیستور نسبت به لامپ الکترونی اشاره شده است .

الف : کوچکتر و سبکتر بودن .

ب : احتیاج نداشتن به فیلامان و در نتیجه ، نداشتن تلفات حرارتی ناشی از گرم کردن فیلامان .

ج : احتیاج نداشتن به مدّت زمان جهت گرم شدن فیلامان .

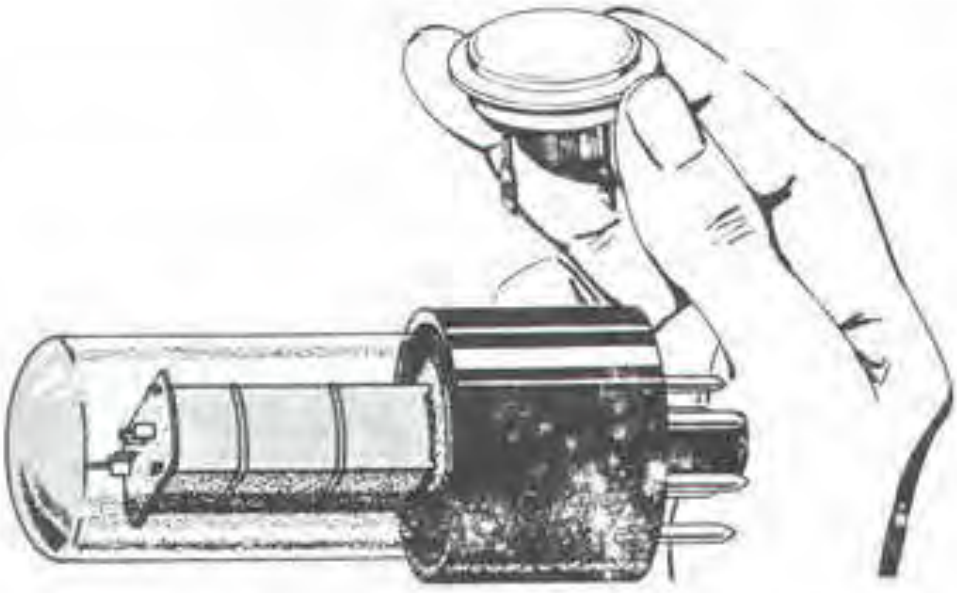
د : کار کردن در ولتاژهای بسیار کم .

هـ : داشتن تحمّل جریان زیاد .

و : استحکام زیاد و داشتن عمر طولانی .

ز : ساده بودن سیم کشی طرحهای ترانزیستوری .

باید توجه داشت که لامپها نیز نسبت به ترانزیستورها از برتریهایی برخوردارند ، از جمله : قدرت بسیار بالا ، تغییر نکردن نقطهٔ کار بر اثر گرما و . . . ولی ترانزیستور با داشتن برتریهای فوق در قدرتهای کم و متوسّط جانشین لامپها شده است . در شکل (۲ ـ ۵) ابعاد و شکل ظاهری یک لامپ و یک ترانزیستور نشان داده شده است .



شکل (۲ـ۵) مقایسهٔ شکل ظاهری ترانزیستور و لامپ

۳ـ۵ـ ساختمان ترانزیستور

ترانزیستور معمولی، یک المان سه قطبی است که از سه کریستال نیمه هادی نوع N و P ـ که در کنار یکدیگر قرار می گیرند ـ تشکیل شده است. ترتیب قرار گرفتن نیمه هادیها در کنار هم، می تواند به دو صورت انجام پذیرد :

الف : دو قطعه نیمه هادی نوع N در دو طرف و نیمه هادی نوع P در وسط.

ب : دو قطعه نیمه هادی نوع P در دو طرف و نیمه هادی نوع N در وسط.

در حالت (الف)، ترانزیستور را NPN و در حالت (ب)، ترانزیستور را PNP می نامند. شکل (۳ـ۵) ترتیب قرار گرفتن نیمه هادیها را کنار یکدیگر نشان می دهد.

شکل (۳ـ۵) ساختمان ترانزیستور

پایه های خروجی ترانزیستور را به ترتیب امیتر[۱] (منتشر کننده)، بیس[۲] (پایه) و کلکتور[۳] (جمع کننده) نامگذاری کرده اند. امیتر را با حرف E، بیس را با حروف B و کلکتور را با حرف C نشان می دهند. پایه های ترانزیستور را می توان با پایه های لامپ تریود، از نظر نوع عملکرد به شرح زیر مقایسه نمود :

الف : امیتر با کاتد

ب : بیس با شبکه فرمان

ج : کلکتور با آند

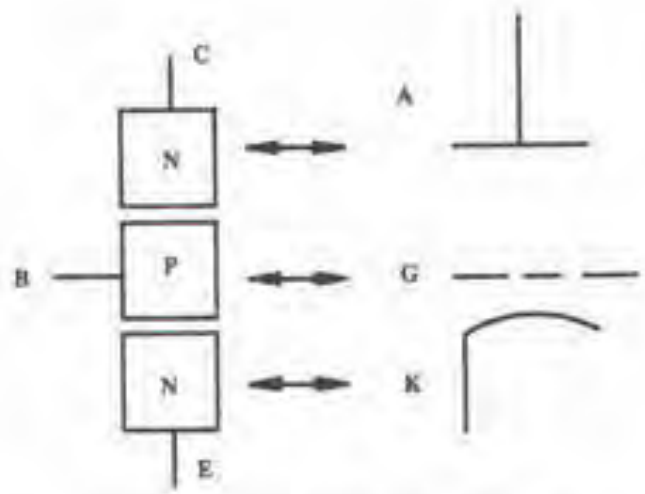
شکل (۴ـ۵) این مقایسه را نشان می دهد.

نیمه هادی نوع P یا N که به عنوان امیتر به کار می رود، نسبت به لایه بیس و کلکتور، دارای نا خالصی بیشتری می باشد. ضخامت این لایه حدود چند ده میکرون است (عملاً

۱ـ Emitter.

۲ـ Base.

۳ـ Collector.

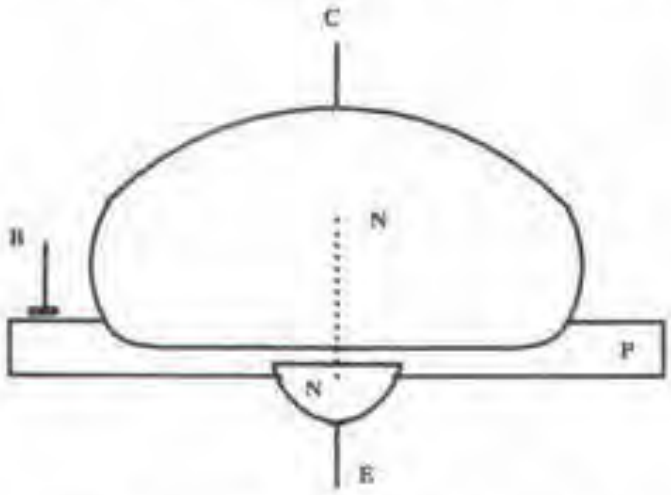


شکل (۴ـ۵) مقایسهٔ پایه های ترانزیستور و لامپ

حدود μm ۲۰۰۰ ـ ۲۰) و سطح تماس آن نیز بستگی به میزان فرکانس و قدرت ترانزیستور دارد .

لایهٔ بیس نسبت به کلکتور و امیتر دارای ناخالصی کمتری است و ضخامت آن نیز به مراتب کمتر از امیتر و کلکتور می باشد و عملاً از چند میکرون تجاوز نمی کند .

ناخالصی لایهٔ کلکتور از امیتر کمتر و از بیس بیشتر است . ضخامت این لایه به مراتب بزرگتر از امیتر می باشد ، زیرا تقریباً تمامی تلفات حرارتی ترانزیستور در کلکتور ایجاد می شود . شکل (۵ـ۵) تصویری از نسبت تقریبی لایه ها را نشان می دهد . سطح تماس کلکتور با بیس حدوداً نه برابر سطح تماس امیتر با بیس می باشد .



شکل (۵ـ۵) نمایش نسبت تقریبی لایه های ترانزیستور

این نوع ترانزیستورها را به اختصار BJT (Bipolar Junction Transistor) می نامند . عبارت Bipolar یا دو قطبی ، ناشی از عملکرد الکترونها و حفره ها به عنوان

حاملهای جریان می باشد .

۴ ـ ۵ ـ معادل دیودی ترانزیستور

هر ترانزیستور، دارای سه پایه و دو پیوند می‌باشد . هر پیوند را می توان به صورت یک دیود نشان داد . در نتیجه، معادل دیودی یک ترانزیستور می تواند به صورت دو دیود ـ مطابق شکل (۶ ـ ۵) ـ نشان داده شود .

شکل (۶ـ۵) معادل دیودی ترانزیستور

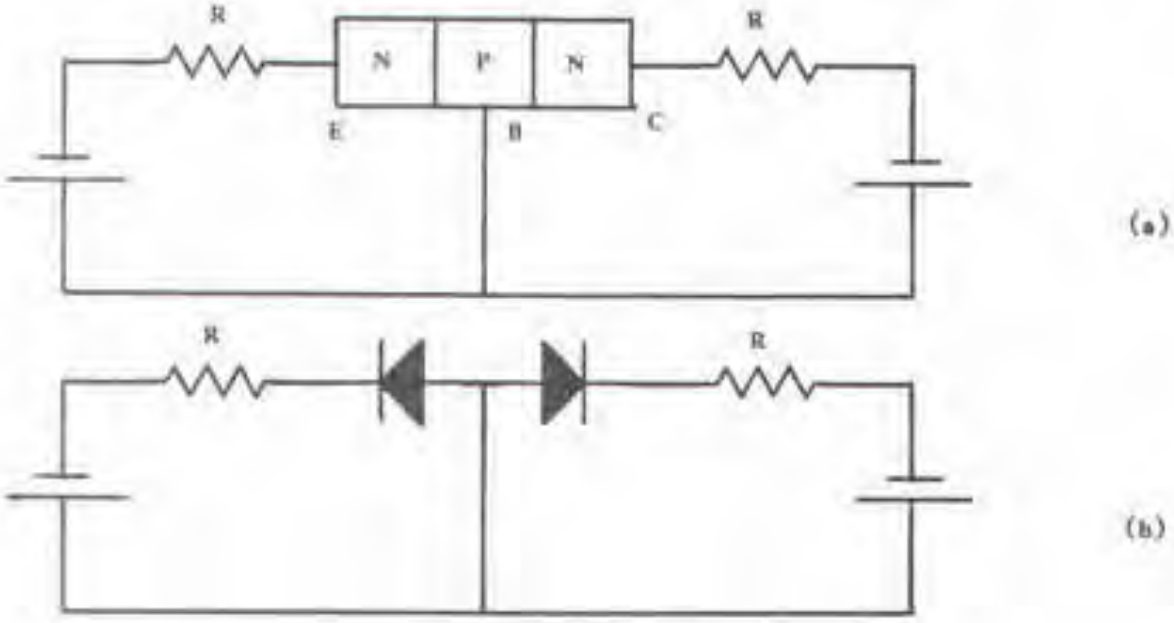
۵ ـ ۵ ـ عملکرد ترانزیستور

۱ـ۵ـ۵ـ بایاسینگ ترانزیستور: برای اینکه بتوان از ترانزیستور به عنوان تقویت کننده، سوییچ و ... استفاده نمود، ابتدا باید ترانزیستور را از نظر ولتاژ dc تغذیه کرد، عمل تغذیه ولتاژ پایه های ترانزیستور را بایاسینگ ترانزیستور می نامند .

با توجّه به اینکه ترانزیستور، دارای سه پایهٔ مجزّاست، می توانیم یکی از پایه ها را به عنوان پایهٔ مشترک و دو پایهٔ دیگر را به عنوان ورودی و خروجی در نظر بگیریم . اتّصال ولتاژ dc به پایه های مختلف ترانزیستور، نحوهٔ کار آن را بیان می نماید . چون تعداد پایه های ترانزیستور سه عدد است، لذا می توانیم ولتاژ dc رابه فرمهای مختلف به ترانزیستور متّصل کنیم . در این قسمت به شرح انواع اتّصال ولتاژ dc به ترانزیستور می پردازیم . لازم به تذکر است که در اینجا بیس بین ورودی و خروجی مشترک گرفته شده است .

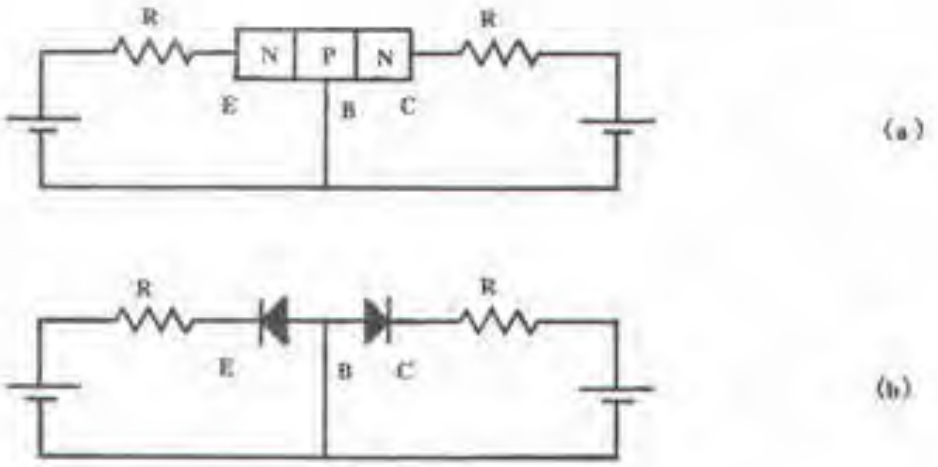
الف : اتّصال بیس ـ امیتر درباياس مستقیم و اتّصال بیس ـ کلکتور در بایاس معکوس باشد . شکل (a ـ ۷ ـ ۵) این نوع بایاسینگ را نشان می دهد . مقاومت R در این شکل برای کنترل جریان به کاررفته است .

شکل (b ـ ۷ ـ ۵) مدار معادل شکل (a ـ ۷ ـ ۵) می باشد . همانطوری که از شکل مدار معادل پیداست، در این حالت بایاسینگ، دو جریان I_E (جریانی را که از امیتر عبور می کند) و I_C (جریانی را که از کلکتور عبور می کند) هر کدام مسیر جداگانه ای را در دوحلقه طی می کنند و فقط در پایه بیس با یکدیگر جمع شده، دوباره تقسیم می گردند .



شکل (۷ـ۵) بایاسینگ موافق

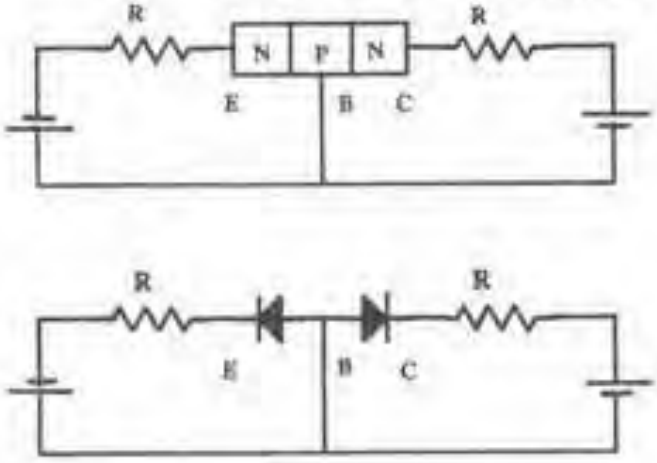
ب : اتّصال بیس ـ امیتردر بایاس معکوس و اتّصال بیس ـ کلکتور در بایاس معکوس باشد این نوع اتّصال در شکل (a ـ ۸ ـ ۵) نشان داده شده است . شکل (b ـ ۸ ـ ۵) مدارمعادل شکل (a ـ ۸ ـ ۵) می باشد . همانطوری که از مدار معادل پیداست ، هردو دیود در بایاس معکوسند و قطع می باشند . لذا جریان I_E و I_C برابر صفر است (البتّه جریان بسیار ضعیفی در اثر شکستن پیوندها در دمای معمولی از مدارعبور می کند [جریان اشباع معکوس] که ما فعلاً آن را در نظر نمی گیریم .) ترانزیستوردر این حالت هیچ عملی را انجام نمی دهد .



شکل (۸ـ۵) بایاسینگ مخالف

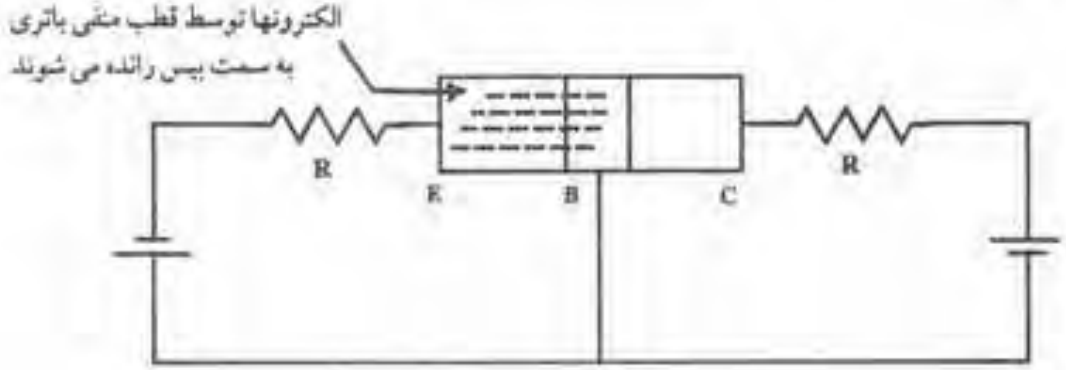
ج : اتّصال بیس ـ امیتر در بایاس مستقیم و اتّصال بیس ـ کلکتور در بایاس معکوس

باشد شکل (۹ـ۵) این نوع بایاسینگ را نشان می دهد :



شکل (۹ـ۵) بایاسینگ موافق و مخالف

همانطوری که از شکل (۹ـ۵) پیداست، اتّصال بیس ـ امیتر در بایاس مستقیم می‌باشد، لذا باید یک جریان در مدار بیس ـ امیتر داشته باشیم . (در این قسمت استثناناً جهت جریان را در جهت واقعی یا جهت حرکت الکترونها در نظر می گیریم .) شکل (۱۰ـ۵)

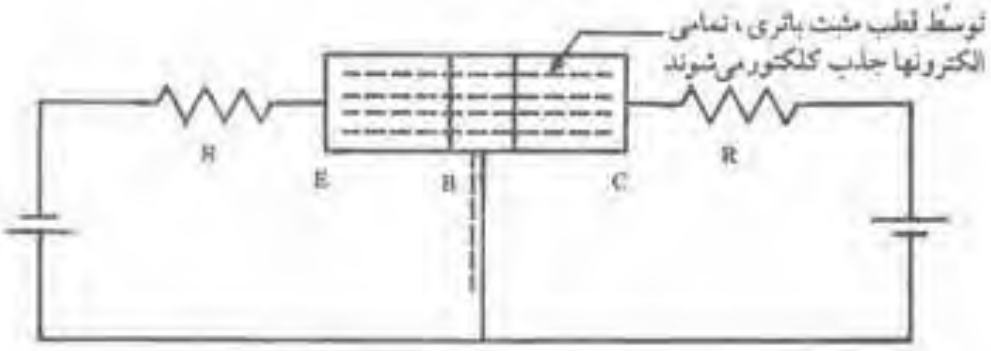


شکل (۱۰ـ۵)

همانطوری که از شکل (۱۰ـ۵) پیداست، الکترونهای نیمه هادی نوع N، توسّط ولتاژ منفی باتری به سمت بیس رانده می شوند . از قبل دانستیم که لایهٔ بیس نسبت به امیتر و کلکتور دارای ناخالصی کمتری است و ضخامت آن نیز نسبت به دو لایه دیگر فوق العاده کم می‌باشد . در اینجا سؤالی پیش می آید که آیا این جریان الکترونها مسیر خود را از طریق امیتر ـ بیس می بندد یا اتّفاق دیگری می افتد ؟

در وهله اول به نظر می آید که جریان الکترونها مسیر خود را باید از طریق بیس ـ امیتر ببندد، ولی عملاً این طور نیست و قسمت اعظم این جریان از طریق کلکتور بسته می شود .

دلیل این عمل آن است که اولاً، به کلکتور ولتاژ مثبت وصل شده است و این ولتاژ قادر است الکترونها را به طرف خودجذب کند. ثانیاً، لایه بیس بسیار نازک است و الکترونها به محض وارد شدن به لایهٔ بیس ـ به خاطر کم بودن این فاصله با کلکتور ـ جذب آن می شوند. ثالثاً، سطح کلکتور حدود ۹ برابر بزرگتر از سطح امیتر می باشد، لذا احاطه کامل بر ورود الکترونها به لایه بیس داشته، تقریباً تمامی آنها را جذب می کند. رابعاً، ناخالصی بیس کم است و الکترونها با حفره ها کمتر ترکیب می شوند. لذا تقریباً بیش از ۹۵٪ الکترونهایی که وارد لایه بیس می شوند، مدار خود را از طریق کلکتور می بندند. شکل (۱۱ ـ ۵) نسبت تقسیم تقریبی الکترونها بین کلکتور و بیس را نشان می دهد.



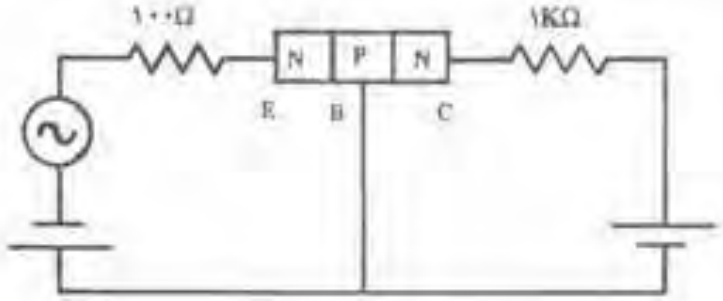
شکل (۱۱ـ۵) الکترونهای عبوری از بیس و کلکتور

با توجّه به مباحث بالا باید ببینیم کدام یک از پاراسینگهای فوق صحیح است؟ برای پی بردن به این موضوع باید بدانیم در کدام یک از پاراسینگهای فوق، ترانزیستور عمل تقویت را انجام می دهد.

۲ـ۵ـ ۵ ـ چگونگی عمل تقویت کنندگی ترانزیستور: برای تقویت یک سیگنال الکتریکی توسّط ترانزیستور، باید سیگنال را به ورودی ترانزیستور داده، از خروجی آن، تقویت شدهٔ آن را بگیریم. در شکل (۱۲ ـ ۵)، پایهٔ بیس به عنوان پایهٔ مشترک بین ورودی و خروجی و امیتر ـ بیس به عنوان ورودی ترانزیستور و کلکتور ـ بیس به عنوان خروجی آن در نظر گرفته شده است. اتّصال بیس ـ امیتر در پاراس مستقیم و اتّصال بیس ـ کلکتور را در پاراس معکوس قرار می دهیم.

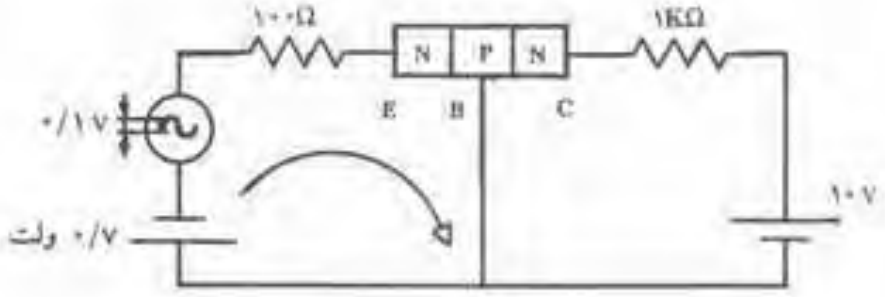
شکل (۱۲ـ۵)

اتّصال بیس ـ امیتر در بایاس مستقیم است، لذا مقاومت آن کم می‌باشد و اتّصال بیس ـ کلکتور در بایاس معکوس می‌باشد، لذا مقاومت آن زیاد است . حال یک مقاومت، مثلاً ۱۰۰ اهم، را جهت کنترل جریان در ورودی ترانزیستور با اتّصال بیس ـ امیتر سری می‌نماییم . از آنجایی که اتّصال کلکتور ـ بیس در بایاس معکوس می‌باشد، لذا سری کردن یک مقاومت زیاد، مثلاً ۱ کیلو اهم، اثر چندانی روی ترانزیستور ندارد . شکل (۱۳ ـ ۵)



شکل (۱۳ـ۵)

یک سیگنال متناوب با دامنهٔ مثلاً ۰/۱ ولت را به ورودی ترانزیستور اعمال می‌کنیم . می‌خواهیم ببینیم آیا این سیگنال تقویت خواهد شد یا نه ؟ ولتاژ بایاسینگ امیتر ـ بیس را حدود ۰/۷ ولت (زیرا ۰/۷ ولت، دیود امیتر ـ بیس را کاملاً هادی می‌سازد .) و ولتاژ کلکتور ـ بیس را حدود ۱۰ ولت انتخاب می‌نماییم . چون دیود کلکتور ـ بیس در بایاس معکوس می‌باشد، لذا هیچ گونه اشکالی، در مدار به وجود نمی‌آورد . شکل (۱۴ ـ ۵)



شکل (۱۴ـ۵)

جریانی که در مدار امیتر ـ بیس به وجود می‌آید، برابر است با : (R دینامیکی دیود امیتر ـ بیس برابر ۲۰Ω فرض می‌شود) .

$$I = \frac{0/1V}{100\Omega + 20\Omega} = 0/83mA$$

همانطور کـه در قسمت (ج ـ ۱ ـ ۵ ـ ۵) گفـته شـد، قسـمت اعظم جریانـی که در قسمت امیتر ـ بیس ایجاد می شود، از طریق کلکتور مسیر خود را می بندد . لذا این جریان از کلکتور و مـقاومت یک کـیلو اهم که با کلکتـور سری شده است نیـز عبـور می کند و دوسر مقاومت یک کیلو اهم افت ولتاژ متناوبی برابـر (با فرض اینکه تمامی جریان از کلکتور عبور کند) :

$$U_R = ۰/۸۳mA \times ۱K\Omega = ۰/۸۳V$$

در دو سر آن ایجـاد می شود که خیـلی بزرگتر از ولتاژ ورودی است . لـذا می توانیم سیگنال تقویت شده را از دو سر مقاومت یک کیلو اهم دریافت نماییم .

اگرضریب تقویت، برابر $A\upsilon = \frac{\text{دامنهٔ سیگنال خروجی}}{\text{دامنهٔ سیگنال ورودی}}$ باشد؛ ضریب تقویت این مدار برابر است با :

$$A\upsilon = \frac{۰/۸۳}{۰/۱} = ۸/۳$$

بنابراین با طرّاحی مدارات ترانزیستوری و با تغییر مقاومتها می توان دامنهٔ سیگنال را به هر مقدار دلخواه تقویت نمود . همانطوری که مشاهده شد جریانی که از مقاومت ۱۰۰ اهمی عبور کرد از مـقاومت یک کیلو اهمی نیز عبور می نماید و این عـمل توسّط ترانزیستور انجام شد . لذا می توان گفت که ترانزیستور، عـمل انتقال مقاومت را (مثلاً از ۱۰۰Ω به ۱KΩ در مثـال ذکر شـده بالا) انجام می دهـد . بنابراین نام ترانزیستـور از همین عـمل ترانزیسـتور و کلمات زیر انتخاب شده است .

Transistor = Transfer Of resistor

مطالب زیر را به خاطر بسپارید :

۱ ـ ترانزیستور از سـه نیمه هادی نوع P و N ، که کنار یکدیگر قـرار می گیرند، تشکیل شده است .

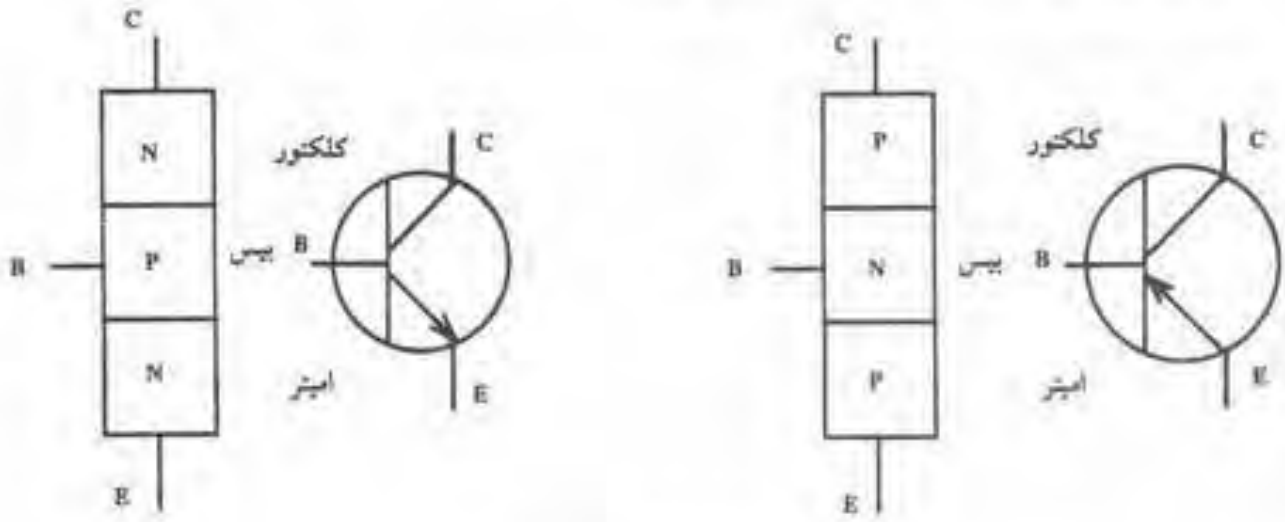
۲ ـ کنار هم قرار گرفتن نیمه هادی به صورت PNP و NPN می باشد .

۳ ـ پایه های ترانزیسـتور را امـیتـر ـ بیس و کلکتـور نامـگذاری می نمایند . امیتر نسبت به دو پایه دیگر دارای نا خالصی بیشتر است و بیس دارای نا خالصی کم و کلکتور دارای ناخالصی معمولی می باشد .

۴ ـ لایهٔ بیس دارای ضخامت کم (حدود میـکرون)، و کلکتور دارای ضخامتی به مراتب بزرگتر از بیس می باشد .

۵ ـ برای اینکه بتوان ترانزیستور را به عنوان تقویت کننده به کار برد، باید اتّصال بیس ـ امیتـر را در بایاس مستقیم و اتّصال بیس ـ کلکتور را در بایاس معکوس قرار داد .

۳ـ۵ـ ۵ـ نمای سمبلیک ترانزیستور: برای نشان دادن ترانزیستور به طور ساده‌تر در نقشه ها، از یک علامت اختصاری استفاده می شود. شکل (۱۵ ـ ۵) نمای سمبلیک ترانزیستورهای PNP و NPN را نشان می دهد.



شکل (۱۵ـ۵) نمای ترانزیستور

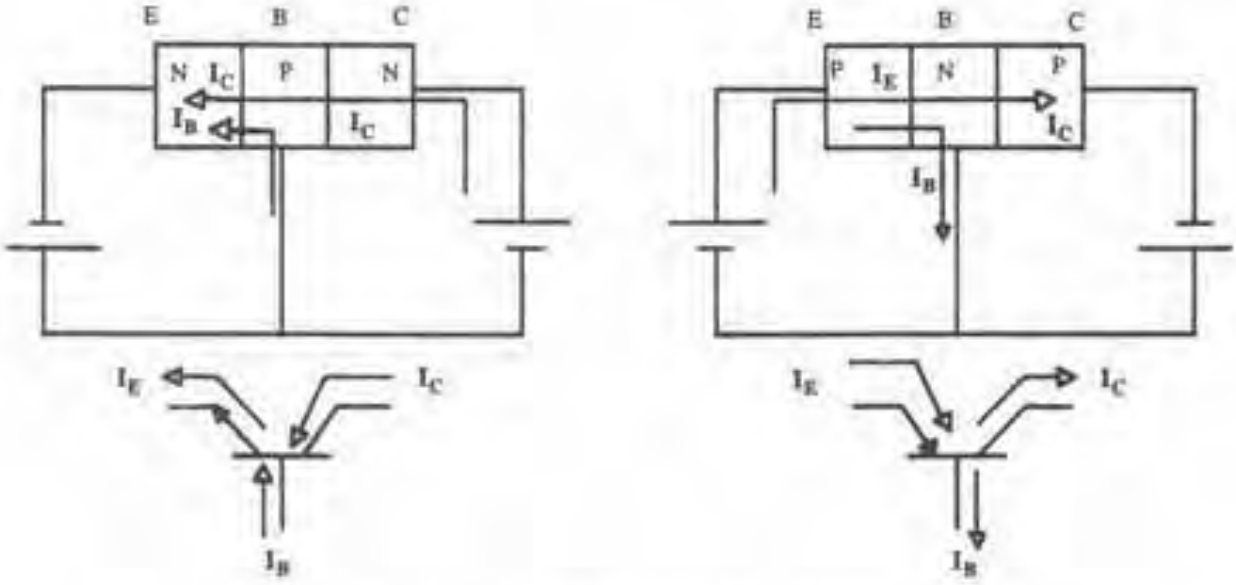
جهت فلش در نمای سمبلیک ترانزیستور، نشان دهندهٔ جهت دیود امیتر ـ بیس می باشد.

۴ـ۵ـ ۵ـ جهت جریانها در ترانزیستور: جریانی که از کلکتور عبور می کند با حرف I_C و جریانی که از بیس عبور می کند با حرف I_B و جریانی که از امیتر عبور می کند با حرف I_E نشان داده می شود. همانطوری که در قسمت (ج ـ ۱ـ ۵ ـ ۵) گفته شد جریانی که از امیتر عبور می کند، به دو انشعاب تقسیم می شود. قسمت بسیار کمی از جریان از بیس و قسمت اعظم آن از کلکتور عبور می کند؛ لذا جریان امیتر برابر است با جریان بیس به علاوه جریان کلکتور. یعنی:

$$I_E = I_B + I_C$$

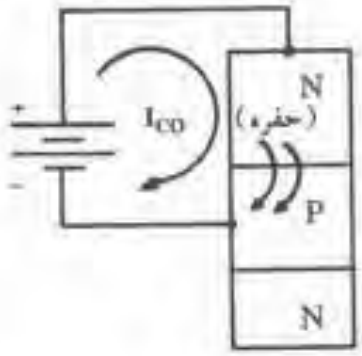
برای سادگی و درک جهت جریان، معمولاً جهت قراردادی را در نظر می گیرند. در جهت قراردادی، جریان از قطب مثبت باتری یا منبع تغذیه خارج و پس از عبور از مدار خارجی به قطب منفی آن وارد می شود. در شکل (۱۶ ـ ۵) جهت جریانها در دو ترانزیستور NPN و PNP نشان داده شده است. جهت جریان قرار دادی، همیشه با جهت دیود بیس ـ امیتر مطابقت دارد.

همانطوری که در شکل (۱۶ ـ ۵) دیده می شود، رابطهٔ $I_E = I_C + I_B$ برای هر دو نوع ترانزیستور صادق است.



شکل (۱۶ـ۵) جهت جریان قراردادی در ترانزیستور

۵ـ۵ـ۵ـ تأثیر درجهٔ حرارت در ترانزیستور: افزایش درجهٔ حرارت، بیشتر بر روی جریان معکوس کلکتور بیس، نسبت به جریانهای دیگر، اثر می گذارد. مطابق شکل (۱۷ـ۵) با توجّه به اینکه بیس ـ کلکتور در بایاس مخالف قرار دارد، جریان بسیار ضعیفی ـ که عامل آن حاملهای اقلیّت (حفره‌ها) هستند ـ از کلکتور به طرف بیس جاری می شود. این جریان را جریان قطع کلکتور نامیده، با I_{CO} نمایش می دهند.

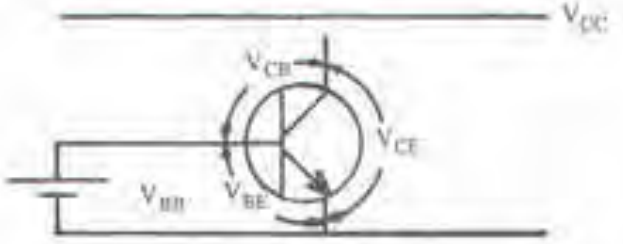


بایاس معکوس پیوند

شکل (۱۷ـ۵) نمایش جریان I_{CO}

۶ـ۵ـ۵ـ نامگذاری ولتاژهای ترانزیستور: برای اینکه بتوان از ترانزیستور به عنوان تقویت کنندهٔ سیگنالهای الکتریکی و یا . . . استفاده نمود، باید ترانزیستور را با ولتاژ dc تغذیه کرد. در هرحالت، ولتاژهایی که به قسمتهای مختلف ترانزیستور باید اعمال شود، فرق می کند. در این قسمت به نامگذاری ولتاژ قسمتهای مختلف می پردازیم.

ولتاژی کـه بین پایه‌های بیس وامیتر قرار می گیرد با V_{BE} ، ولتاژی که در قسمت کلکتور ـ بیس قرار می گیرد با V_{CB} ، ولتاژی که بین کلکتور ـ امیتر وصل می شود با V_{CE} ، ولتاژ منبع تغذیه کلکتور را با V_{CC} و ولتاژی که انرژی بیس را تأمین می کند با V_{BB} نشان می دهیم . شکل (۱۸ـ۵) ولتاژهای قسمتهای مختلف ترانزیستور را نشان می دهد . بین ولتاژهای ترانزیستور ، رابطهٔ $V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$ برقرار می باشد .



شکل (۱۸ـ۵)

۶ ـ ۵ ـ آرایشهای ترانزیستور

آرایش ترانزیستور در مدار ، به سه صورت امیتر مشترک[۱] ، بیس مشترک[۲] و کلکتور مشترک[۳] می باشد که به بررسی مختصر هر آرایش و بیان علّت نامگذاری آن می پردازیم .

۱ ـ ۶ ـ ۵ ـ پایهٔ مشترک در ترانزیستور : در ترانزیستور ، همیشه سیگنال ورودی به دوپایه از سه پایهٔ ترانزیستور داده می شود و سیگنال خروجی از دو پایه آن گرفته می شود ، به طوری کـه یکی از پایه ها بین ورودی و خروجی ، مشترک می باشد لذا با توجه به پایهٔ مشترک نام آرایش انتخاب می شود .

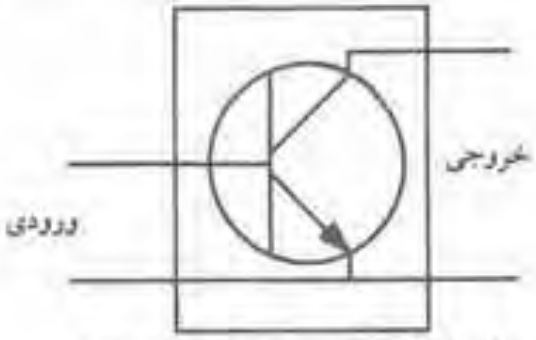
۲ ـ ۶ ـ ۵ ـ آرایش امیتر مشترک : در این آرایش پایهٔ امیتر ، بین ورودی و خروجی مدار مشترک می باشد و علت نامگذاری این آرایش نیز به خاطر مشترک بودن پایهٔ امیتر است . در هر آرایشی پایهٔ مشترک را مبنا قرار می دهند وولتاژهای نقاط مختلف مدار را نسبت به آن اندازه می گیرند . شکل (۱۹ ـ ۵) آرایش امیتر مشترک را بدون رسم سایر المانهای مورد نیاز ، نشان می دهد . چنانچه بخواهند آرایش را با ترانزیستور PNP نشان دهند فقط باید پلاریتهٔ منبع تغذیه و جهت فلش امیتر ، معکوس گردد و بقیهٔ قسمتهای مدار

۱ـ Common Emitter (C . E .)

۲ـ Common Base (C . B .)

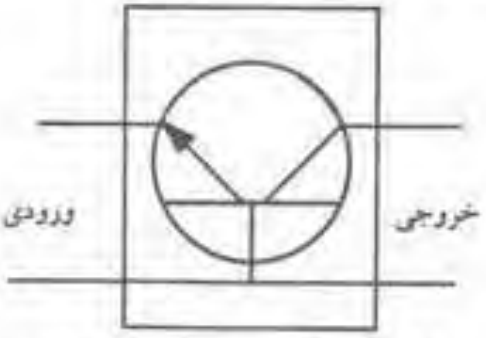
۳ـ Common Collector (C . C.)

دست نخورده باقی می ماند . آرایش امیتر مشترک ، کاربرد بیشتری در مدارات دارد .



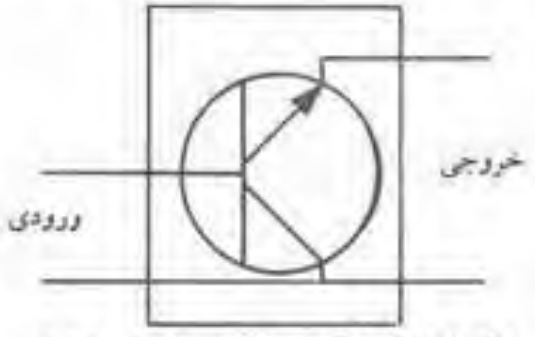
شکل (۱۹ـ۵) آرایش امیتر مشترک (CE)

۳ـ۶ـ۵ـ آرایش بیس مشترک : در این آرایش ، چون پایهٔ بیس بین ورودی و خروجی مشترک می باشد آرایش آن را نیز بیس مشترک نامیده اند . شکل (۲۰ـ۵) این آرایش را به طور ساده نشان می دهد .



شکل (۲۰ـ۵) آرایش بیس مشترک (CB)

۴ـ۶ـ۵ـ آرایش کلکتور مشترک : پایهٔ مشترک بین ورودی و خروجی ، در این آرایش ، کلکتور می باشد و به خاطر مشترک بودن پایهٔ کلکتورنیز به آن کلکتور مشترک می گویند . شکل (۲۱ـ۵) آرایش کلکتور مشترک را نشان می دهد . این آرایش را امیتر فالوور[1] نیز می گویند .



شکل (۲۱ـ۵) آرایش کلکتور مشترک (CC)

۱ـ Emitter Follower

مطالب زیر را به خاطر بسپارید :

۱ ـ جهت جریان قراردادی در ترانزیستور ، با جهت فلش امیتر ، مطابقت دارد .

۲ ـ I_{CO} جریان کلکتور ـ بیس در بایاس مخالف است و عامل آن حاملهای اقلیت می باشند .

۳ ـ ولتاژ کلکتور ـ امیتر ، برابر مجموع ولتاژهای کلکتور ـ بیس و بیس ـ امیتر می باشد .

۴ ـ پایهٔ مشترک بین ورودی و خروجی ترانزیستور ، نام آرایش را مشخص می کند .

ـ آرایش امیتر مشترک نسبت به بقیه ، کاربرد بیشتری دارد .

ـ سیگنال ورودی و خروجی را نسبت به پایهٔ مشترک می سنجند .

ـ نام دیگر آرایش کلکتور مشترک ، امیتر فالوور می باشد .

ـ پایه های ورودی و خروجی مطابق جدول زیر می باشد .

نام آرایش	پایه های ورودی	پایه های خروجی
CE	B – E	C – E
CB	E – B	C – B
CC	B – C	E – C

۷ ـ ۵ ـ منحنیهای مشخّصه ترانزیستور

روابط بین جریانها و ولتاژها و تغییرات آنها در ترانزیستور و همچنین ضریب تقویت به عاملهایی چون درجهٔ حرارت ، فرکانس و غیر خطّی بودن المانها بستگی دارد ، (منظور از غیر خطّی بودن ، این است که نسبت تغییرات جریانها و ولتاژها تابع یک معادله ریاضی نیست .) لذا ، معمولاً از طریق ریاضی نمی توان مقادیر را درست به دست آورد . برای به دست آوردن این رابطه ها از منحنیهایی که بیان کنندهٔ روابط بین جریانها و ولتاژها می باشد ، استفاده می شود . این منحنیها عبارتند از :

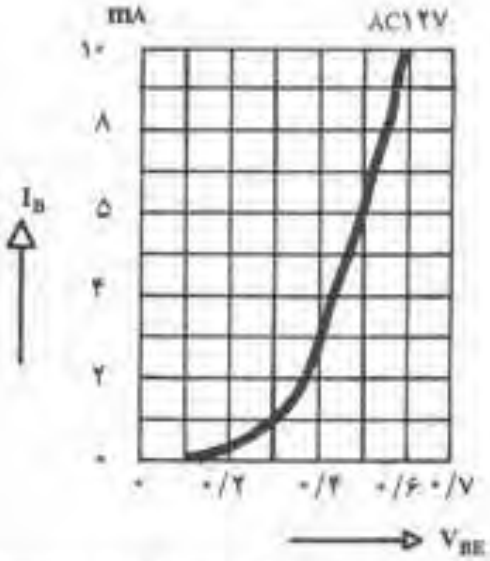
الف : منحنی مشخّصه ورودی

ب : منحنی مشخّصه انتقالی

ج : منحنی مشخّصه خروجی

در یک ترانزیستور ، منحنیهای مشخّصه دیگری نیز وجود دارد که بعداً مورد بحث قرار می گیرند . در ادامهٔ بحث ، راجع به هر یک از سه منحنی ذکر شده توضیحاتی داده خواهد شد .

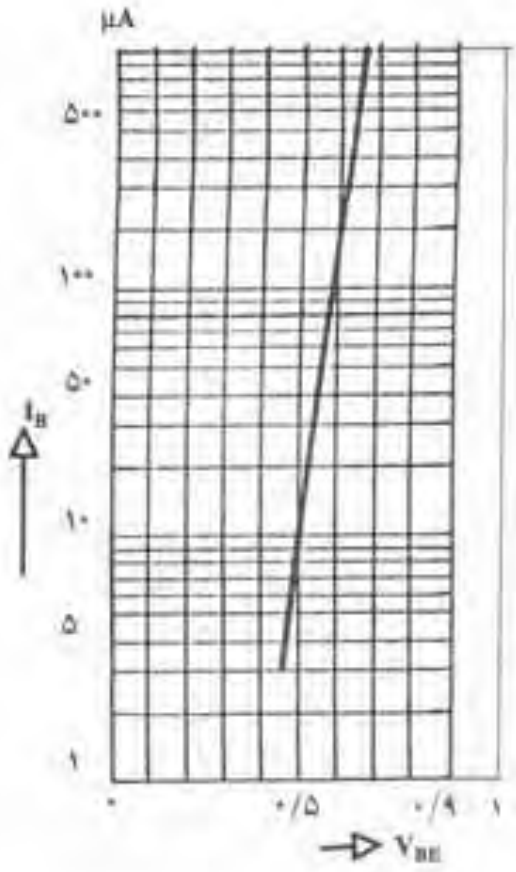
الف ـ منحنی مشخّصه ورودی : منحنی مشخّصه ورودی ترانزیستور ، بیان کنندهٔ مقدار جریان ورودی ، بر حسب ولتاژ ورودی می باشد . چون مدار ورودی شبیه یک دیود می باشد ، لذا منحنی مشخّصه آن نیز شبیه منحنی مشخّصه ولت ـ آمپر دیود معمولی است . شکل (۲۲ـ۵) منحنی مشخّصه ورودی ترانزیستور AC ۱۲۷ را نشان می دهد .



شکل (۲۲ـ۵) منحنی ورودی ترانزیستور AC۱۲۷ به صورت خطی

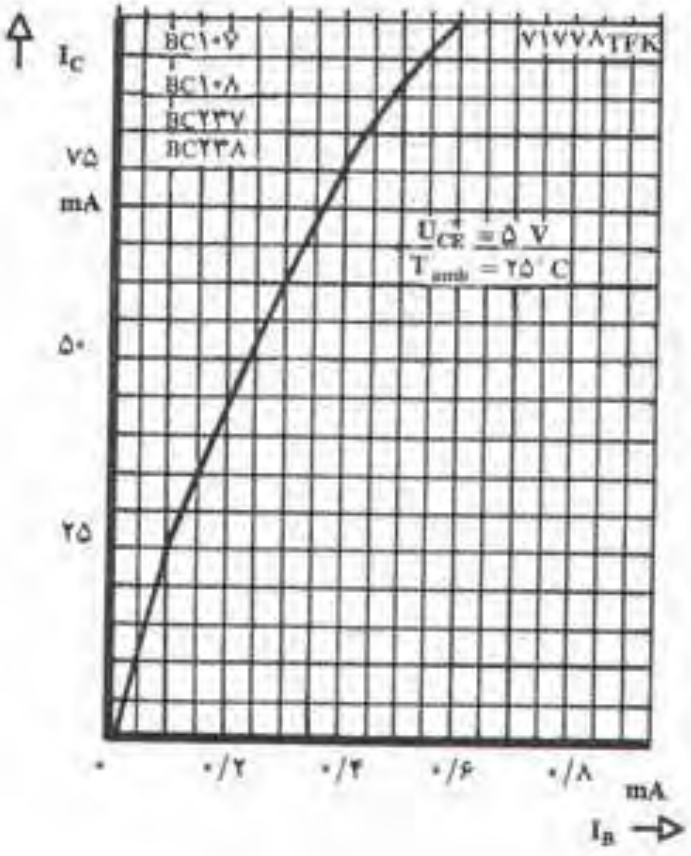
مقیاس بالا ، با تقسیمات خطّی می باشد ، ولی تعدادی از کارخانه های سازنده ، منحنیهای مشخّصه ورودی را با تقسیمات نیمه لگاریتمی نیز می دهند . شکل (۲۳ـ۵) منحنی مشخّصه ورودی ترانزیستور BC ۱۰۷ با تقسیمات نیمه لگاریتمی را نشان می دهد .

به عنوان مثال ، در شکل (۲۳ـ۵) اگر $V_{BE} = ۰/۶V$ باشد ، $I_B = ۱۰ \mu A$ خواهد شد . و یا اگر $V_{BE} = ۰/۶۵V$ باشد ، مقدار $I_B = ۵۰ \mu A$ می شود . باید توجّه داشت که منحنی مشخّصه ورودی به ازای یک ولتاژ معیّن V_{CE} رسم می شود . اگر V_{CE} تغییر کند منحنی نیز کمی تغییر می کند . البتّه این تغییرات بسیار جزیی است و می توان در اکثر موارد از آن صرف نظر نمود . مقدار ولتاژ V_{CE} را که به ازای آن منحنی مشخّصه ورودی رسم شده است کارخانه سازنده ، مشخّص می نماید .



شکل (۲۳ـ۵) منحنی ورودی ترانزیستور BC ۱۰۷ به‌صورت نیمه لگاریتمی

ب ـ منحنی مشخصه انتقالی ترانزیستور : منحنی مشخصه انتقالی ، رابطهٔ بین جریان ورودی و خروجی ترانزیستور را به ازای مقادیر ثابت V_{CE} نشان می‌دهد . شکل (۲۴ـ۵) منحنی مشخصه انتقالی ترانزیستور BC ۱۰۷ را به ازای $V_{CE} = 5V$ نشان می‌دهد .



شکل (۲۴ـ۵) منحنی مشخصه انتقالی ترانزیستور BC ۱۰۷ با $V_{CE} = 5V$

چون ضریب تقویت جریان ، برابر نسبت جریان خروجی به جریان ورودی می‌باشد ، لذا روی این منحنی می توان ضریب تقویت جریان را به دست آورد .

ج ـ منحنی مشخّصه خروجی : منحنی مشخّصه خروجی ترانزیستور ، رابطهٔ بین جریان و ولتاژ خروجی به ازای جریان ورودی معیّن را نشان می دهد . اگر تقویت کننده امیتر مشترک باشد (تقویت کننده امیتر مشترک بعداً توضیح داده خواهد شد) جریان ورودی I_B و جریان خروجی I_C و ولتاژ خروجی V_{CE} خواهد بود . (تقریباً تمامی کارخانه های سازندهٔ ترانزیستور ، منحنی مشخّصه ترانزیستور را در حالت امیتر مشترک ارائه می دهند) . شکل (۲۵ـ۵) منحنی مشخّصه خروجی ترانزیستور و نواحی کار آن را به ازای یک جریان I_B ثابت ، نشان می دهد .

مقدار جریان خروجی (I_C)، تابع دو عامل I_B و V_{CE} می باشد. یعنی با کم و زیاد شدن I_B جریان خروجی (I_C) نیز کم یازیاد می شود . این مطلب در مورد V_{CE} نیز صادق است ، لیکن تأثیر تغییرات V_{CE} بر I_C ناچیز و در مواردی غیر قابل توجّه است . از طرفی جریان I_B هم به V_{BE} بستگی دارد .

منحنی مشخّصه خروجی ترانزیستور ، شامل سه ناحیهٔ قطع ، فعال و اشباع می باشد .

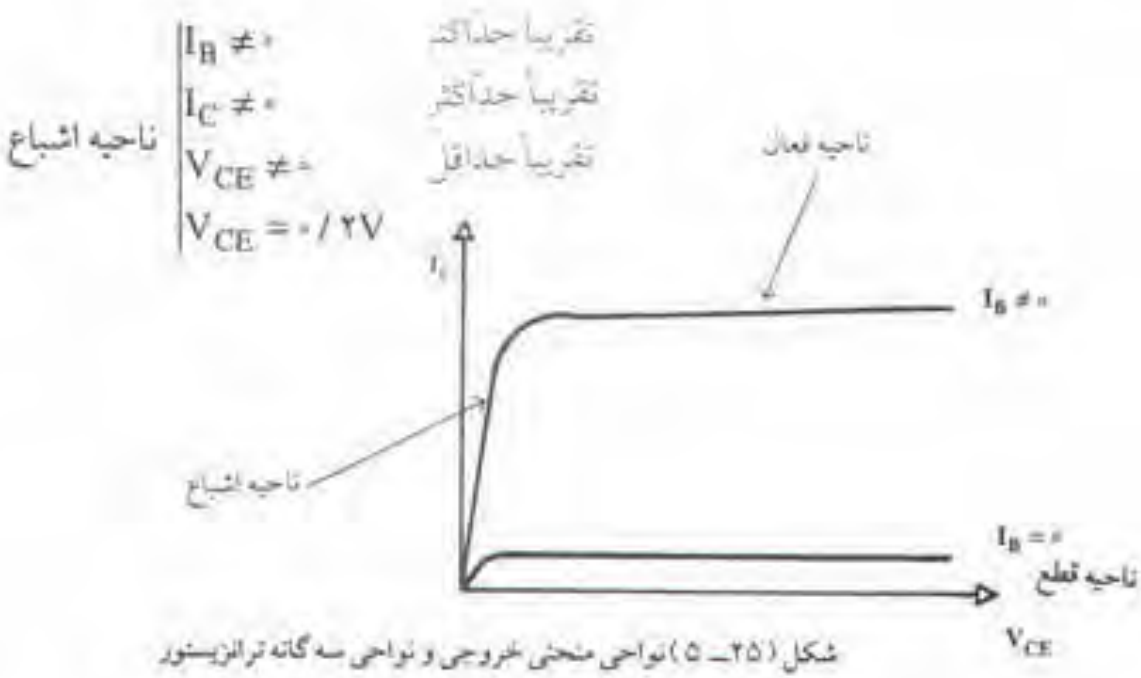
ناحیهٔ قطع ـ ناحیه ای است که جریان بیس ، صفر و ترانزیستور هنوز به آستانهٔ هدایت نرسیده است . لذا دارای مشخّصات زیر است :

ناحیه قطع
$$\begin{cases} I_B = 0 \\ I_C = 0 \\ V_{CE} \approx V_{CC} \end{cases}$$

ناحیهٔ فعّال ـ در این ناحیه ، ترانزیستور در حال هدایت است و با تغییرات زیاد V_{CE} تغییرات جریان کلکتور کم می باشد(ثابت I_B) . لذا دارای مشخّصات زیر است :

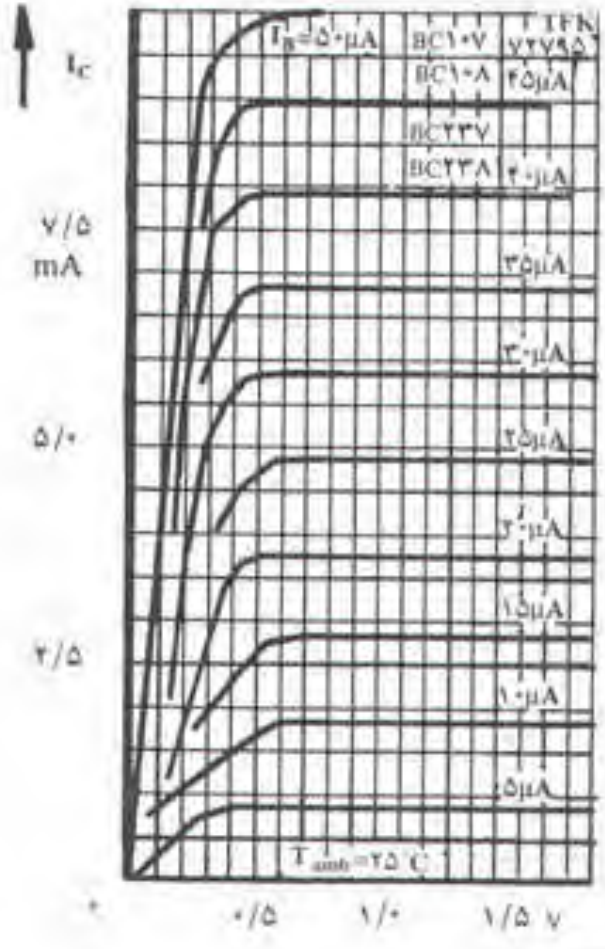
ناحیهٔ فعّال
$$\begin{cases} I_B \neq 0 \\ I_C \neq 0 \\ V_{CE} \neq 0 \end{cases}$$

ناحیه اشباع ـ ناحیه ای است که ترانزیستور در حال هدایت است ، ولی با تغییرجزیی V_{CE} (کسری از ولت) تغییرات بسیار زیادی در جریان کلکتور مشاهده می شود . لذا دارای مشخصات زیر می باشد :



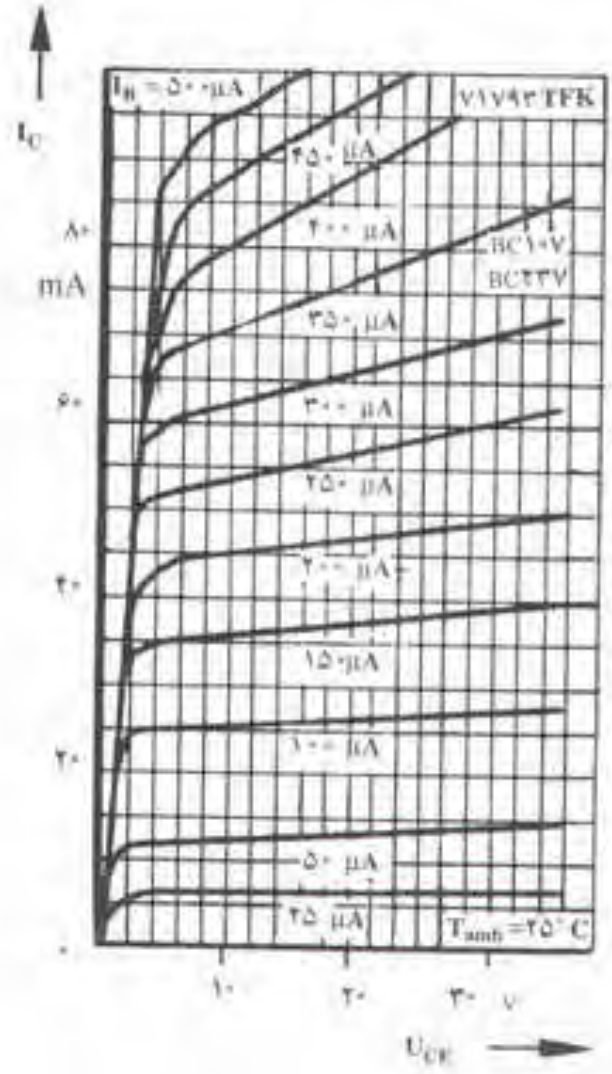
شکل (۲۵ـ ۵) نواحی منحنی خروجی و نواحی سه گانه ترانزیستور

معمولاً کارخانه های سازنده ، قسمت اشباع منحنی مشخصه خروجی را در دسترس قرار می دهند . شکل (۲۶ـ ۵) منحنی مشخصه کامل خروجی ترانزیستور BC۱۰۹ را نشان می دهد .



شکل (۲۶ـ ۵) منحنی مشخصه خروجی ترانزیستور BC۱۰۹

شکل (۲۷ـ۵) منحنی مشخصه خروجی ترانزیستور BC ۱۰۷ را به ازای چندین I_B های مختلف نشان می دهد .



شکل (۲۷ـ۵) منحنی مشخصه ترانزیستور خروجی BC۱۰۷

در منحنی شکل (۲۷ ـ ۵) ، اگر $V_{CE} = ۱۰V$ و $I_B = ۲۰۰\mu A$ باشد مقدار $I_C = ۴۵mA$ خواهد شد .

۸ ـ ۵ ـ تأمین ولتاژها و جریانهای مورد نیاز ترانزیستور

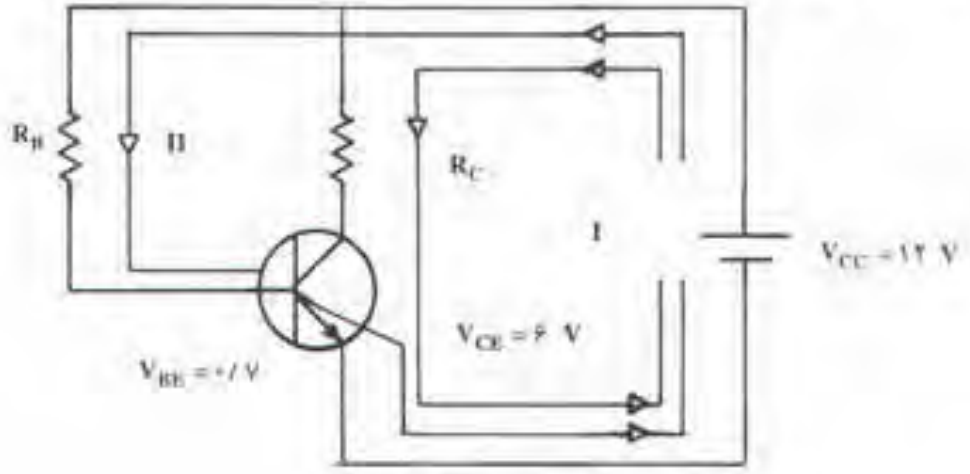
مقدار ولتاژی که باید به قسمتهای مختلف ترانزیستور یا مدارات ترانزیستوری اعمال شود با یکدیگر فرق می کند . مثلاً ولتاژی که باید بین بیس و امیتر قرار گیرد ، حدود ۰/۶۵V و مقدار ولتاژی که بین کلکتور و امیتر باید قرار گیرد حدود نصف ولتاژ منبع تغذیه می باشد و . . . بنابراین مشاهده می شود که در یک مدار ترانزیستوری ، نیاز به تعداد زیادی

منبع تغذیه با ولتاژهای مختلف می‌باشد ، که تأمین این همه ولتاژهای مختلف از طریق منابع تغذیه متعدّد امکان‌پذیر نیست . برای تأمین ولتاژهای مختلف از مقاومتهای اهمی استفاده می‌شود . با سری کردن مقاومتها به قسمتهای مختلف مدارات و ایجاد افت ولتاژ لازم ، می‌توان ولتاژ مورد نظر را تأمین نمود . لذا مقاومتها در مدارات الکترونیکی دو کار عمده را انجام می‌دهند : الف ـ ایجاد افت ولتاژ . ب ـ کنترل جریان .

لازم به تذکر است که در انتخاب مقاومتها ، هدفهای دیگری را نیز از جمله تعیین ضریب بهره ، امپدانس ورودی ، امپدانس خروجی و . . . در نظر می‌گیرند .

برای اینکه دریابیم ، چگونه می‌توان با مقاومتهای اهمی ، افت ولتاژهای لازم را ایجاد نمود ، به مثال ساده زیر توجه کنید :

مثال ۱ـ۵ : اگر بخواهیم مقدار ولتاژ V_{CE} در یک ترانزیستور ۶ ولت و مقدار V_{BE} برابر ۰/۷ ولت و مقدار $I_C = ۱۰mA$ و مقدار $I_B = ۰/۱mA$ باشد ، مقدار مقاومتهایی را که باید با ترانزیستور سری شوند ، به دست آورید ، مدار شکل (۲۸ـ۵) . ولتاژ منبع تغذیه ۱۲ ولت می‌باشد .



شکل (۲۸ـ۵)

در مدار شکل (۲۸ـ۵) اگر بخواهیم $V_{CE} = ۶V$ بشود ، باید مقدار ۶ ولت ولتاژ دو سر مقاومت R_C افت کند تا جمع دو ولتاژ برابر ولتاژ منبع تغذیه بشود . بنابراین :

$U_{RC} = ۶$ ولت

از آنجایی که می‌خواهیم $I_C = ۱۰mA$ بشود ، و این جریان از R_C نیز عبور می‌کند لذا مقدار R_C با توجّه به جریان عبوری از آن برابر :

$$U_{RC} = R_C . IC$$

$$R_C = \frac{U_{RC}}{I_C} = \frac{۶}{۱۰mA} = ۶۰۰\Omega$$

طبق قانون ولتاژ کیرشهوف (KVL)[1] می توان محاسبات بالا را در حلقه I شکل (۲۸ـ۵) به صورت زیر نوشت :

$$-V_{CC} + R_C I_C + V_{CE} = ۰$$
$$-۱۲ + R_C \times ۱۰mA + ۶ = ۰$$
$$R_C = \frac{۱۲-۶}{۱۰mA} = ۶۰۰\Omega$$

همچنین طبق قانون ولتاژ کیرشهوف (KVL) می توانیم معادلهٔ حلقهٔ II شکل (۲۸ـ۵) را نوشته ، مقدار R_B را نیز محاسبه نماییم .

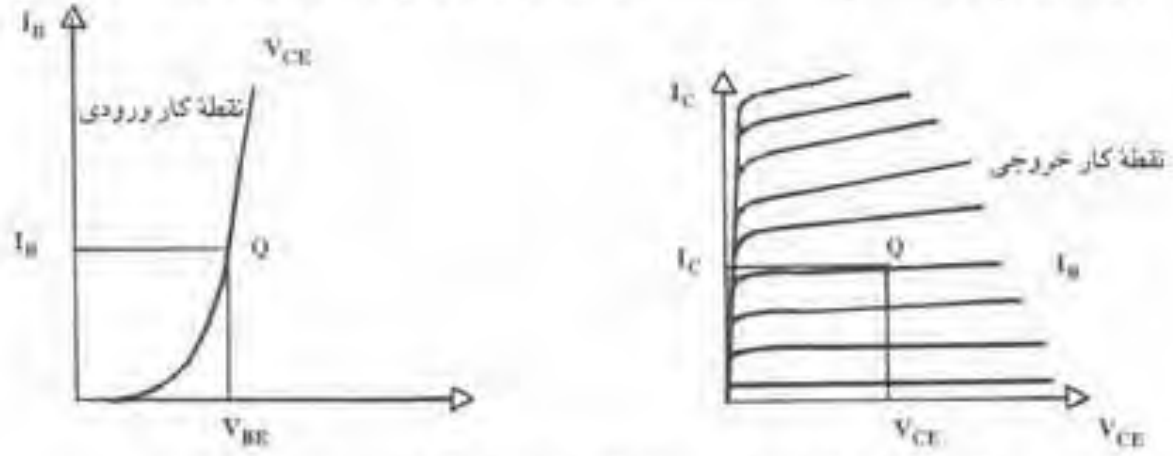
$$-V_{CC} + R_B I_B + V_{BE} = ۰$$
$$-۱۲ + R_B \times ۰/۱mA + ۰/۷ = ۰$$
$$R_B = \frac{۱۲-۰/۷}{۰/۱mA} = ۱۱۳K\Omega$$

بنابراین ، با قراردادن مقاومتهای با مقادیر به دست آمده ، مقدار V_{CE} و V_{BE} و I_B و I_C طبق خواستهٔ صورت مسأله به دست می آید . مقاومتی را که با کلکتور سری می شود با R_C و مقاومتی که با بیس سری می شود با R_B نشان می دهند .

۹ـ۵ـ نقطهٔ کار و خط بار

۱ـ۹ـ۵ـ نقطهٔ کار

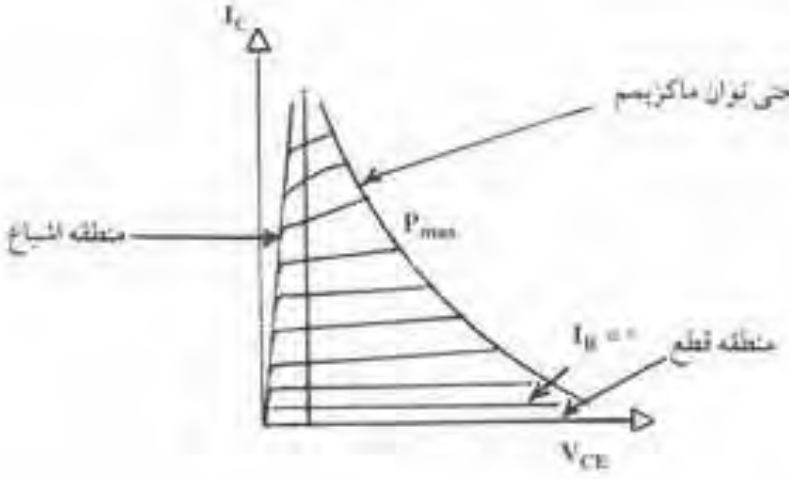
الف ـ تعریف نقطهٔ کار : به مقادیر dc کمیّتهای $V_{BE} - V_{CE} - I_B - I_C$ نقطهٔ کار ترانزیستور می گویند. شکل (۲۹ـ۵) نقطهٔ کار ورودی وخروجی یک ترانزیستور را نشان می دهد .



شکل (۲۹ـ۵) نمایش تغییرات نقطه کار Q روی منحنی مشخصه ورودی و خروجی

۱ـ KVL = Kirshof Voltage . Law .

ب ـ انتخاب نقطهٔ کار : برای انتخاب نقطهٔ کار ، ابتدا باید محدودیتهای ترانزیستور را در نظر گرفت . از جمله محدودیتها ، تحمّل توان تلف شده در ترانزیستور ـ حداکثر جریان کلکتور ـ حداکثر ولتاژ بین کلکتور و امیتر می باشد که در آخر این فصل راجع به مقادیر ماکزیمم توضیحاتی داده خواهد شد . از آنجایی که تلفات توان توسط ترانزیستور برابر $P_T = V_{CE}.I_C + V_{BE}.I_B$ می باشد ، (لازم به تذکر است که مقدار $V_{BE}.I_B$ کم بوده و معمولاً از آن صرف نظر می کنند .) لذا نقطهٔ کار باید در محلّی قرار گیرد که حاصلضرب $V_{CE}.I_C$ مساوی یا کمتر از ماکزیمم توان قابل تحمّل ترانزیستور باشد . رسم مشخّصه $V_{CE}.I_C$ در شکل (۳۰ـ۵) آمده است . همچنین محل نقطهٔ کار نباید در محل $I_B = 0$ (منطقهٔ قطع) باشد (منطقهٔ قطع منطقه ای است که جریان ورودی ترانزیستور برابر صفر باشد) . در ضمن نقطهٔ کار باید در محلّی قرار گیرد که بتواند سیگنال را از دو طرف به یک اندازه تقویت کند . شکل (۳۰ـ۵) منطقهٔ قطع ، اشباع و توان ماکزیمم را نشان می دهد .



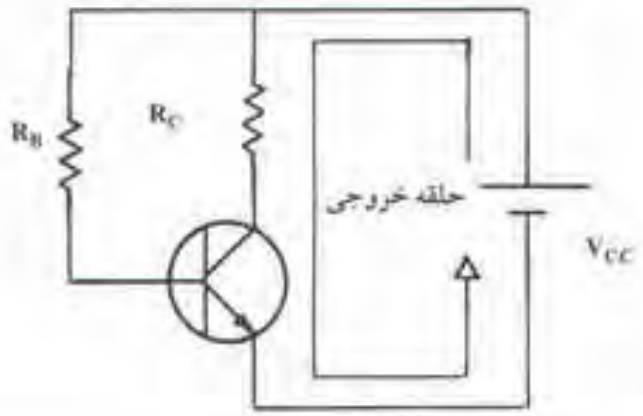
شکل (۳۰ـ۵)

۲ـ۹ـ۵ـ خط بار : بر روی منحنی مشخّصه خروجی ترانزیستور ، می توان نقاط زیادی را به عنوان نقطهٔ کار انتخاب نمود . با تغییر ولتاژ منبع و یا R_B و یا R_C ، نقطهٔ کار جدیدی به دست می آید . اگر چند نقطهٔ کار را به صورتی پیدا کنیم که در آنها ولتاژ منبع تغذیه و مقاومت R_C ثابت مانده باشد ، ملاحظه خواهیم کرد که نقاط مذکور روی یک خط مستقیم قرار خواهند گرفت که به آن خط بار ترانزیستور می گویند . به تعبیر دیگر خط بار ، مکان هندسی نقاطی است که در آن نقاط ، مقادیر V_{CC} و R_C ثابت بماند .

برای رسم خط بار ، باتوجّه به جهت جریان و جهت گردش در حلقهٔ خروجی از یک

نقطه (مثلاً قطب منفی منبع تغذیه) مدار شکل (۳۱ـ۵) معادله KVL را می‌نویسیم.
بدین طریق:

$$-V_{CC} + R_C I_C + V_{CE} = ۰$$



شکل (۳۱ـ۵)

در معادلهٔ فوق R_C و V_{CC} ثابت ولی I_C و V_{CE} متغیر هستند. لذا برای به‌دست آوردن حداقل دو نقطه از خط بار، یکبار I_C را برابر صفر فرض کرده، در معادله خروجی قرار می‌دهیم و V_{CE} را به‌دست می‌آوریم (نقطه A) و بار دیگر V_{CE}، را برابر صفر فرض کرده، در معادله خروجی قرار می‌دهیم و I_C را به‌دست می‌آوریم (نقطه B) نقاط A و B را به هم وصل کرده تا خط بار به‌دست آید.

نقطه A

$$I_C = ۰$$
$$-V_{CC} + ۰ \times R_C + V_{CE} = ۰$$
$$\boxed{V_{CE} = V_{CC}}$$

نقطه B

$$V_{CE} = ۰$$
$$-V_{CC} + I_C R_C + ۰ = ۰$$
$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

مثال ۲ـ۵: درصورتی که در مدار شکل (۳۱ـ۵)، $V_{CC} = ۶V$ و $R_C = ۱K\Omega$ باشد، خط بار آن را روی منحنی مشخصه شکل (۳۲ـ۵) رسم کنید.

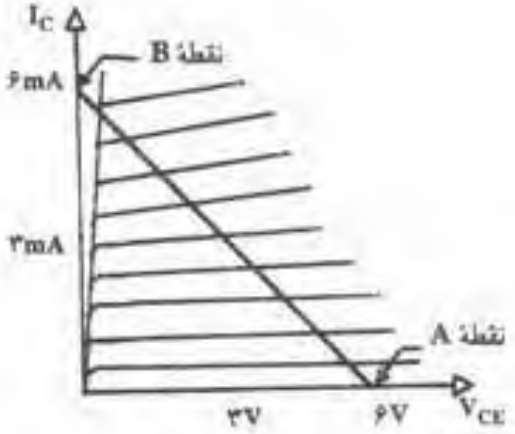
نقطه A

$$-V_{CC} + I_C R_C + V_{CE} = ۰$$
$$I_C = ۰$$
$$-۶ + ۱K\Omega \times ۰ + V_{CE} = ۰$$
$$\boxed{V_{CE} = ۶V}$$

$$
\text{نقطه B}\quad
\begin{cases}
-V_{CC}+I_CR_C+V_{CE}=0\\
V_{CE}=0\\
-6+1K\Omega\times I_C+0=0\\
I_C=\dfrac{6V}{1K\Omega}=6mA
\end{cases}
$$

حل : ابتدا معادله KVL حلقه خروجی را می نویسیم با فرض $I_C = 0$ ، مقدار V_{CE} را به دست می آوریم . برای نقطهٔ B با توجه به معادلهٔ KVL حلقه خروجی و فرض $V_{CE} = 0$ ، مقدار I_C را به دست می آوریم .

اکنون مقادیر محاسبه شده برای A و B را روی منحنی مشخصهٔ خروجی شکل (۳۲ـ۵) جدا می کنیم . با اتصال A به B خط بار خواسته شده به دست می آید .



شکل (۳۲ـ۵)

برروی خط بار ، می توان چندین نقطه کار ، با شرایطی که قبلاً ذکر شد ، انتخاب نمود . چگونگی انتخاب نقطهٔ کار و محدودهٔ کلاس کارهای مختلف بعداً توضیح داده خواهد شد .

مطالب زیر را به خاطر بسپارید :

۱ ـ منحنی مشخصه ترانزیستور ، مشخص کننده روابط بین جریانها و ولتاژهای مختلف آن می باشد .

۲ ـ کارخانه های سازنده ، معمولاً منحنی مشخصه خروجی هر ترانزیستور را در اختیار مصرف کننده قرار می دهد .

۳ ـ در منطقهٔ قطع $I_B = 0$ در نتیجه $I_C = 0$ است . در منطقهٔ اشباع $I_B \neq 0$ اما به ازای تغییرات ناچیز[1] V_{CE} تغییرات I_C به مقدار حداکثر خود در مدار

۱ ـ معمولاً این تغییرات برای ترانزیستور (Ge) ژرمانیم ۰/۲ ـ ۰/۱ و برای ترانزیستور (Si) سیلیکونی ۰/۵ ـ ۰/۲ است .

نزدیک می شود.

۴ ـ از مقاومتها، برای ایجاد افت ولتاژ و کنترل جریان و . . . در مدارات الکترونیکی استفاده می شود.

۵ ـ مقادیر DC کمیتهای I_C و I_B و V_{CE} و V_{BE} را نقطهٔ کار گویند.

۶ ـ خط بار، از معادلهٔ (KVL) حلقه خروجی به ازای $I_C = 0$ و $V_{CE} = 0$ به دست می آید.

۷ ـ نقطهٔ کار، متناسب با طرّاحی مدار و محدودیتهای پیش بینی شده انتخاب می شود.

۱۰ ـ ۵ ـ بررسی روابط بین جریانها و ولتاژها در ترانزیستور

همانگونه که قبلاً نیز گفته شد، بین جریانها و ولتاژها در ترانزیستور روابط زیر برقرار می باشد:

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

اکنون با ضرایب دیگری چون α و β و γ که در محاسبات مدارهای ترانزیستوری استفاده می شوند، آشنا می شویم. ضرایب فوق به صورت زیر تعریف می شوند.

نسبت جریان کلکتور به جریان امیتر $\alpha = \frac{I_C}{I_E}$

نسبت جریان کلکتور به جریان بیس $\beta = \frac{I_C}{I_B}$

نسبت جریان امیتر به جریان بیس $\gamma = \frac{I_E}{I_B}$

۱۱ ـ ۵ ـ محاسبهٔ روابط α و β و γ بر حسب یکدیگر

۱ ـ ۱۱ ـ ۵ ـ محاسبهٔ α بر حسب β و بر عکس:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

به جای I_E مساوی آن یعنی: $I_B + I_C$ را قرار می دهیم.

$$\alpha = \frac{I_C}{I_C + I_B}$$

صورت و مخرج کسر حاصل را بر I_B تقسیم می کنیم

$$\alpha = \frac{\frac{I_C}{I_B}}{\frac{I_C}{I_B} + \frac{I_B}{I_B}}$$

قبلاً $\frac{I_C}{B}$ به‌صورت β تعریف شده ، بنابراین

$$\boxed{\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}} \quad (1)$$

رابطهٔ β بر حسب α نیز چنین است . چرا؟

$$\boxed{\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}} \quad (2)$$

۲ـ۱۱ـ۵ـ محاسبهٔ γ بر حسب β :

$$\gamma = \frac{I_E}{I_B} = \frac{I_C + I_B}{I_B} = \frac{I_C}{I_B} + \frac{I_B}{I_B}$$

$$\boxed{\gamma = \beta + 1} \quad (3)$$

۳ـ۱۱ـ۵ـ محاسبهٔ α بر حسب β و γ :

با استفاده از روابط (۱) و (۳) می توان نوشت :

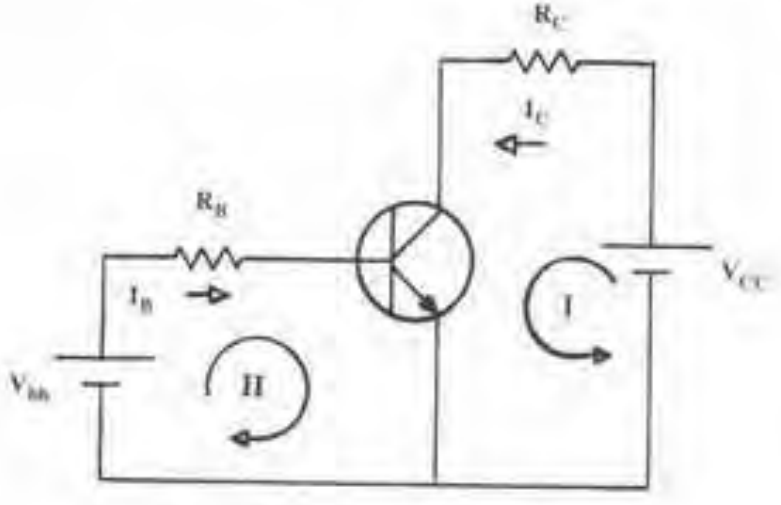
$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} = \frac{\beta}{\gamma}$$

$$\boxed{\alpha = \frac{\beta}{\gamma}} \quad (4)$$

۱۲ ـ ۵ ـ تغذیهٔ ترانزیستور

از ترانزیستور ، درصورتی می توان به‌عنوان یک تقویت کننده استفاده کرد که ولتاژهای لازم به پایه‌های آن برسد و ترانزیستور را در حالت هدایت قرار دهد . انواع بایاسینگی (تغذیه) که ترانزیستور را در ناحیه هدایت قرار می دهد سه نوع است که به شرح هر یک می پردازیم .

۱ـ۱۲ـ۵ـ **بایاسینگ مستقیم** : اگر بخواهیم ترانزیستور در نقطهٔ کار Q کار کند ، باید ، مطابق شکل (۳۳ ـ ۵) ، یک منبع ولتاژ بین بیس امیتر و منبع دیگری بین کلکتور امیتر قرار دهیم .



شکل (۳۳ـ ۵) ترانزیستور با تغذیه مستقیم

$$\text{نقطهٔ کار Q} \begin{cases} I_B = ۰/۱\text{mA} \\ I_C = ۵\text{mA} \\ V_{CE} = ۶\text{V} \\ V_{BE} = ۰/۲\text{V} \end{cases}$$

$$\text{معلومات} \begin{cases} V_{CC} = ۱۲\text{V} \\ V_{bb} = ۲\text{V} \end{cases}$$

با استفاده از باتریها و ولتاژهای موجود و نقطهٔ کار Q، مقادیر R_B و R_C را می‌توان محاسبه نمود.

در حلقه‌های شماره I و II با استفاده از KVL می‌توان نوشت:

$KVL_{(I)}$ $\quad -V_{CC} + I_C R_C + V_{CE} = ۰$

$$-۱۲ + ۵R_C + ۶ = ۰$$

$۵R_C = ۶$ $\quad \boxed{R_C = ۱/۲\text{K}\Omega}$

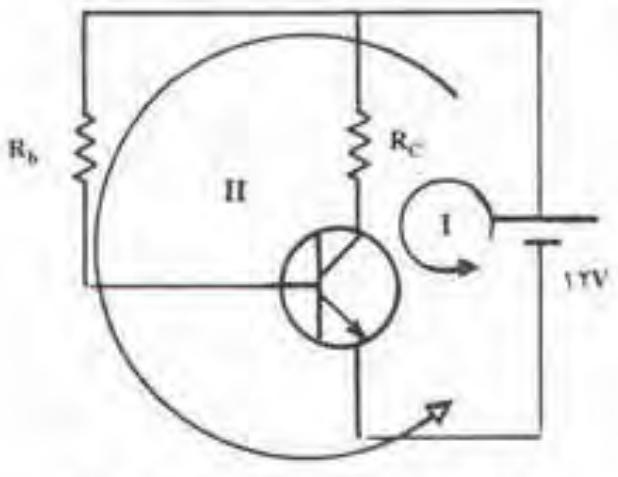
$KVL_{(II)}$ $\quad -V_{BB} + I_B R_B + V_{BE} = ۰$

$$-۲ + ۰/۱R_B + ۰/۲ = ۰$$

$$۰/۱R_B = ۱/۸ \qquad \boxed{R_B = ۱۸\text{K}\Omega}$$

توجّه داشته باشید، اگر جریان برحسب میلی‌آمپر و ولتاژ برحسب ولت باشد، مقدار مقاومت، برحسب کیلواهم به دست می‌آید.

حال برای صرفه‌جویی به جای دو باتری تنها از یک باتری $V_{CC} = ۱۲\text{V}$ استفاده می‌کنیم. بنابراین مطابق شکل (۳۴ـ۵) برای نقطهٔ کار Q خواهیم داشت:



شکل (۳۴ـ۵) تغذیهٔ مستقیم با استفاده از یک باتری

$$KVL_{(I)} \quad -V_{CC}+I_CR_C+V_{CE}=۰$$

$$-۱۲+۵R_C+۶=۰$$

$$\boxed{R_C=\frac{۶}{۵}=۱/۲K\Omega}$$

$$KVL_{(II)} \quad -V_{CC}+I_BR_B+V_{BE}=۰$$

$$-۱۲+۰/۱R_B+۰/۲=۰$$

$$\boxed{R_B=\frac{۱۱/۸}{۰/۱}=۱۱۸K\Omega}$$

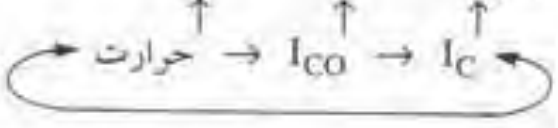
با استفاده از یک باتری ، مقدار $R_C = ۱/۲K$ و $R_B = ۱۱۸K$ به دست آمد که ظاهراً خواسته ما را از لحاظ بایاس تأمین می کند ، ولی باید توجّه داشت که در این مدار ، در اثر حرارت جریان ناخواسته I_{CO} (جریان نشتی) در ترانزیستور به وجود می آید . جریان نشتی در حرارتهای کم ناچیز است و از آن صرفنظر می شود ، ولی در حرارتهای بالا I_{CO} به شدت افزایش یافته ، بناچار از بیس ترانزیستور عبور می کند . از طرفی ، می دانیم که هر جریانی که وارد بیس شود β برابر آن از کلکتور می گذرد ، لذا جریان نشتی که از کلکتور عبور می کند برابر با جریان نشتی اولیه + جریان نشتی تقویت شده ، می باشد . یعنی :

$$I_{CO}+\beta I_{CO}=(۱+\beta)I_{CO}$$

در نتیجه ، اگر جریان I_C واقعی را بخواهیم ، باید جریان نشتی را نیز بدان بیافزاییم .

$$I_C=\beta I_B+(۱+\beta)I_{CO}$$

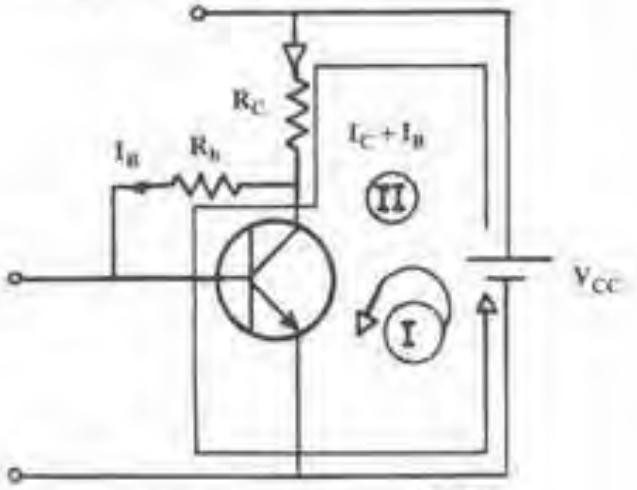
چنانچه برای پیش گیری از افزایش I_{CO} ، اقدامی نشود ، ترانزیستور از نقطهٔ کار Q خارج می گردد و ثبات حرارتی نخواهد داشت زیرا با افزایش درجهٔ حرارت ، I_{CO} زیاد می شود . زیاد شدن I_{CO} نیز حرارت اولیه را زیادتر می کند . حرارت بیشتر ، مجدداً I_{CO} را افزایش داده و همینطور این سیکل افزایش I_{CO} و افزایش حرارت ، ادامه پیدا می کند تا اینکه ترانزیستور کاملاً از نقطهٔ کار خارج شود و یا بسوزد .



بنابراین ، از این نوع بایاسینگ در جاهایی که حرارت پایین و ثابت است ، می توان استفاده کرد که چنین چیزی نیز امکان ندارد لذا باید چاره دیگری اندیشید .

۲ـ۱۲ـ۵ـ بایاسینگ اتوماتیک : یکی از راه حلهای مشکل فوق ، قرار دادن R_B بین بیس کلکتور است که به این نوع تغذیه ، بایاسینگ با فیدبک ولتاژ هم می گویند . با توجّه به نقطهٔ کار Q و $V_{CC} = ۱۲V$ مقادیر R_C و R_B شکل (۳۵ـ۵) به دست می آید :

$$KVL_{(I)} \qquad -V_{CC} + I_E R_C + V_{CE} = ۰$$



شکل (۳۵ـ ۵) ترانزیستور با تغذیهٔ اتوماتیک

$$-۱۲ + (۰/۱ + ۵)R_C + ۶ = ۰ \qquad \boxed{R_C = \frac{۶}{۵/۱} = ۱/۱۷۶K\Omega}$$

$$KVL_{(II)} \qquad -V_{CC} + I_E R_C + I_B R_B + V_{BE} = ۰$$

$$-۱۲ + ۵/۱ \times ۱/۱۷۶ + ۰/۱ \times R_B + ۰/۲ = ۰$$

$$\boxed{R_B = \frac{۵/۸}{۰/۱} = ۵۸K\Omega}$$

این مدار ، جریان کلکتور را به طور اتوماتیک کنترل کرده ، از افزایش I_{CO} جلوگیری می‌کند . زیرا همانگونه که از رابطهٔ $-V_{CC} + I_E R_C + V_{CE} = ۰$ (ثابت↑ ثابت↓) پیداست چون V_{CC} و R_C ثابت هستند لذا اگر در اثر حرارت I_C افزایش یابد ، بناچار V_{CE} کاهش می‌یابد. باکاهش V_{CE} طبق رابطهٔ $-V_{CE} + I_B R_B + V_{BE}$ چون V_{BE} و R_B ثابت هستند I_B کاهش می‌یابد . بدیهی است که کاهش I_B کاهش I_C را نیز به دنبال دارد . بنابراین مدار اتوماتیک ، جریان I_C را در مقابل حرارت ثابت نگه می‌دارد . مطالب فوق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود :

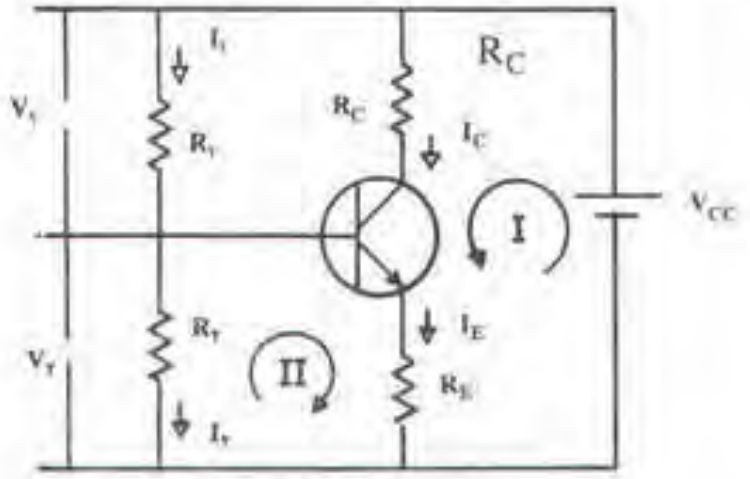
$$\text{حرارت} \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow V_{CE} \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$$

۳ـ۱۲ـ۵ـ **بایاس سرخود** : روش بهتر بایاسینگ و ثبات حرارتی ، بایاس سرخود می‌باشد . در این روش ، مطابق شکل (۳۶ـ۵) یک مقاومت (R_E) سر راه امیتر قرار می‌گیرد و بیس ، توسّط دو مقاومت (R_1 و R_2) به صورت مقسم ولتاژ ، تغذیه می‌شود به این نوع بایاس ، بایاسینگ و فیدبک جریان نیز می‌گویند .

مقاومتهای R_E ، R_C ، R_1 و R_2 را با استفاده از KVL و مفروضاتی که از تجربه

بدست آمده و معلومات داده شده در مثال زیر ، محاسبه می نماییم :

مثال ۳ـ۵ : در مدار شکل (۳۶ـ۵) با توجّه به مفروضـات داده شده و نقطهٔ کار Q ، مقادیر R_C ، R_E ، R_1 و R_2 را به دست آورید :



شکل (۳۶ـ۵) ترانزیستور با تغذیهٔ سرخود

$$\text{مفروضات} \begin{cases} R_E = \dfrac{R_C}{۵} \\ V_{CE} = \dfrac{V_{CC}}{۲} \\ I_2 = ۵I_B \end{cases} \qquad \text{معلومات Q} \begin{cases} V_{CC} = ۱۲V \\ V_{BE} = ۰/۲V \\ I_C = ۵mA \\ I_B = ۰/۱mA \end{cases}$$

حل :

$$KVL_{(I)} \quad -V_{CC} + I_C R_C + V_{CE} + I_E R_E = ۰$$

$$-V_{CC} + I_C R_C + V_{CE} + (I_B + I_C)\frac{R_C}{۵} = ۰$$

$$-۱۲ + ۵R_C + ۶ + ۵/۱ \times \frac{R_C}{۵} = ۰$$

$$۶/۰۲ R_C = ۶ \qquad \boxed{R_C = \frac{۶}{۶/۰۲} = ۰/۹۹۶K\Omega}$$

$$R_C = ۱K\Omega$$

یا

$$KVL_{(II)} \quad -V_{R_2} + V_{BE} + I_E R_E = ۰$$

$$R_E = \frac{R_C}{۵} = \frac{۱}{۵} = ۰/۲K\Omega$$

$$-V_{R_2} + ۰/۲ + ۵/۱(۰/۲) = ۰$$

$$\boxed{V_{R_2} = ۱/۲۲V}$$

باتوجّه به مفروضات داریم : $I_2 = ۵I_B$

$$I_2 = ۵ \times ۰/۱ = ۰/۵mA$$

$$R_2 = \frac{V_{R_2}}{I_2} = \frac{1/22}{0/5}$$

$$\boxed{R_2 = 2/44K\Omega}$$

از تقسیم ولتاژ V_{CC} روی R_1 و R_2 می‌توان نوشت :

$$V_{CC} = V_{R_1} + V_{R_2}$$

$$V_{R_1} = 12 - 1/22 = 10/78V$$

با توجّه به KIL در نقطهٔ B ، می‌توان نوشت :

B) $I_1 = I_B + I_2$

$$I_1 = 0/1 + 0/5 = 0/6mA$$

$$R_1 = \frac{V_{R_1}}{I_1} = \frac{10/78}{0/6}$$

$$\boxed{R_1 = 18K\Omega}$$

در این مدار نیز جریان کلکتور به‌طور خود کار ، کنترل می‌شود ، زیرا داریم :

ثابت ↗ ثابت

$$V_{R_2} = V_{BE}\downarrow + I_E \quad R_E$$

چون R_E و V_{R_2} مقادیر ثابتی هستند با افزایش I_E ، $(I_B + I_C)$ ، بناچار V_{BE} کاهش می‌یابد . کاهش V_{BE} ، خود کاهش I_B را نیز به دنبال دارد ، در نتیجه با کاهش I_B جریان کلکتور (I_C) کاسته می‌شود . سیکل خلاصه شدهٔ مطالب فوق ، به صورت زیر است :

$$\text{حرارت} \rightarrow I_C\uparrow \rightarrow I_E\uparrow \rightarrow V_{BE}\downarrow \rightarrow I_B\downarrow \rightarrow I_C\downarrow$$

برای مطالعه آزاد

۱۳ ـ ۵ ـ پایداری حرارتی

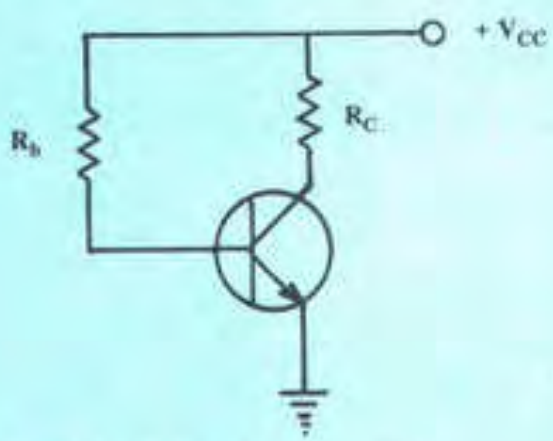
بایاسینگ (تغذیه) ترانزیستور را به سه صورت بررسی کردیم . پایداری مدار بایاسینگ سرخود در مقابل حرارت ، بهتر از مدارهای دیگر است . اکنون پایداری را از لحاظ ریاضی مورد بررسی قرار می‌دهیم .

نسبت تغییرات جریان I_C به تغییرات جریان I_{CO} را ضریب پایداری گویند و آن را با Si نمایش می‌دهند و به صورت زیر می‌نویسند :

$$si = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CO}}$$

هر چه Si بزرگتر باشد ، مدار ناپایدارتر است . بنابراین ، باید سعی شود تا حدّ امکان Si کوچک شود .

۱ ـ ۱۳ ـ ۵ ـ محاسبهٔ ضریب پایداری حرارتی مدار بایاسینگ مستقیم : با توجه به شکل (۳۷ ـ ۵) می توان نوشت :



شکل (۳۷ ـ ۵) ترانزیستور با تغذیهٔ مستقیم

$$I_C = \beta I_B + (1+\beta) I_{CO} \qquad (1)$$

از طرفی داریم

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

با قرار دادن مقدار β در رابطه (۱) خواهیم داشت :

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + (1+\frac{\alpha}{1-\alpha}) I_{CO}$$

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1-\alpha+\alpha}{1-\alpha} I_{CO}$$

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{CO} \qquad (2)$$

اکنون ، اگر از I_B در رابطهٔ (۲) صرفنظر شود و سپس از I_C نسبت به I_{CO} مشتق گرفته شود ، مقدار Si به دست می آید .

$$si = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CO}} = 0 + \frac{1}{1-\alpha} \times 1$$

$$\boxed{si = \frac{1}{1-\alpha}}$$

مثال ۴ ـ ۵ : اگر در مدار شکل (۳۷ ـ ۵) مقدار $\beta = 50$ باشد ، Si آن را حساب کنید .

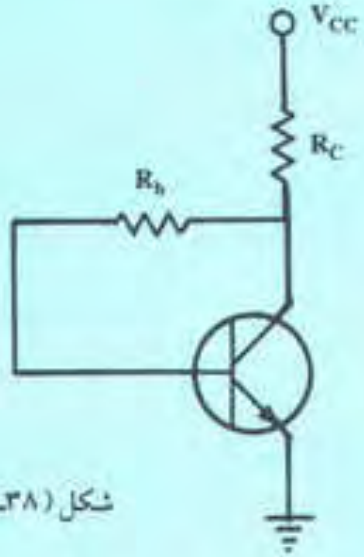
$$\beta = 50 \quad \alpha = \frac{\beta}{\beta+1} = \frac{50}{50+1} = 0/98$$

حل :

$$si = \frac{1}{1-\alpha} = \frac{1}{1-0/98} = \frac{1}{0/02}$$

$$\boxed{si = 50}$$

۲ـ۱۳ـ۵ـ محاسبهٔ ضریب پایداری حرارتی مدار بایاسینگ اتوماتیک : با توجّه به شکل (۳۸ـ۵) و KVL می‌توان نوشت :



شکل (۳۸ـ ۵) ترانزیستور با تغذیه اتوماتیک

$$-V_{CC} + R_C(I_B + I_C) + I_B R_B + V_{BE} = ۰$$
$$-V_{CC} + I_B R_C + I_C R_C + I_B R_B + V_{BE} = ۰$$
$$-V_{CC} + I_B(R_C + R_B) + I_C R_C + V_{BE} = ۰$$
$$I_B(R_C + R_B) = V_{CC} - V_{BE} - I_C R_C$$
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE} - I_C R_C}{R_C + R_B}$$

قبلاً داشتیم که :

$$I_C = \beta I_B + (۱ + \beta) I_{CO}$$

اکنون به جای I_B در رابطهٔ فوق ، مقدار آن را قرار می‌دهیم :

$$I_C = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE} - I_C R_C}{R_C + R_B} + (۱ + \beta) I_{CO}$$

$$I_C = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + R_B} - \beta \frac{I_C R_C}{R_C + R_B} + (۱ + \beta) I_{CO}$$

از I_C در رابطهٔ فوق ، فاکتور می‌گیریم .

$$I_C\left(۱ + \beta \frac{R_C}{R_C + R_B}\right) = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + R_B} + (۱ + \beta) I_{CO}$$

$$I_C = \frac{\beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + R_B} + (۱ + \beta) I_{CO}}{۱ + \beta \frac{R_C}{R_C + R_B}} = \frac{\beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + R_B}}{۱ + \beta \frac{R_C}{R_C + R_B}} + \frac{۱ + \beta}{۱ + \beta \frac{R_C}{R_C + R_B}} I_{CO}$$

اکنون ، از رابطهٔ فوق نسبت به I_{CO} ، مشتق می گیریم .

$$si = \frac{\Delta I_C}{I_{CO}} = ۰ + \frac{۱+\beta}{۱+\beta\dfrac{R_C}{R_C+R_B}} \times ۱$$

به جای β در رابطهٔ فوق $\dfrac{\alpha}{۱-\alpha}$ را قرار می دهیم .

$$si = \frac{۱+\dfrac{\alpha}{۱-\alpha}}{۱+\dfrac{\alpha}{۱-\alpha}\cdot\dfrac{R_C}{R_C+R_B}} = \frac{\dfrac{۱}{۱-\alpha}}{۱+\alpha\dfrac{R_C}{(۱-\alpha)(R_C+R_B)}}$$

$$si = \frac{۱}{\dfrac{(۱-\alpha)(R_C+R_B)+\alpha R_C}{R_C+R_B}} = \frac{۱}{\dfrac{R_C+R_B-\alpha R_C-\alpha R_B+\alpha R_C}{R_C+R_B}}$$

$$si = \frac{۱}{\dfrac{R_C+R_B-\alpha R_B}{R_C+R_B}} = \frac{۱}{۱-\dfrac{\alpha R_B}{R_C+R_B}}$$

کسر $\dfrac{R_B}{R_C+R_B}$ و α هر دو همیشه کوچکتر از واحد هستند . بنابراین مخرج کسر نسبت به حالت قبل بزرگتر است و در نتیجه Si کوچکتر از حالت قبل می شود .

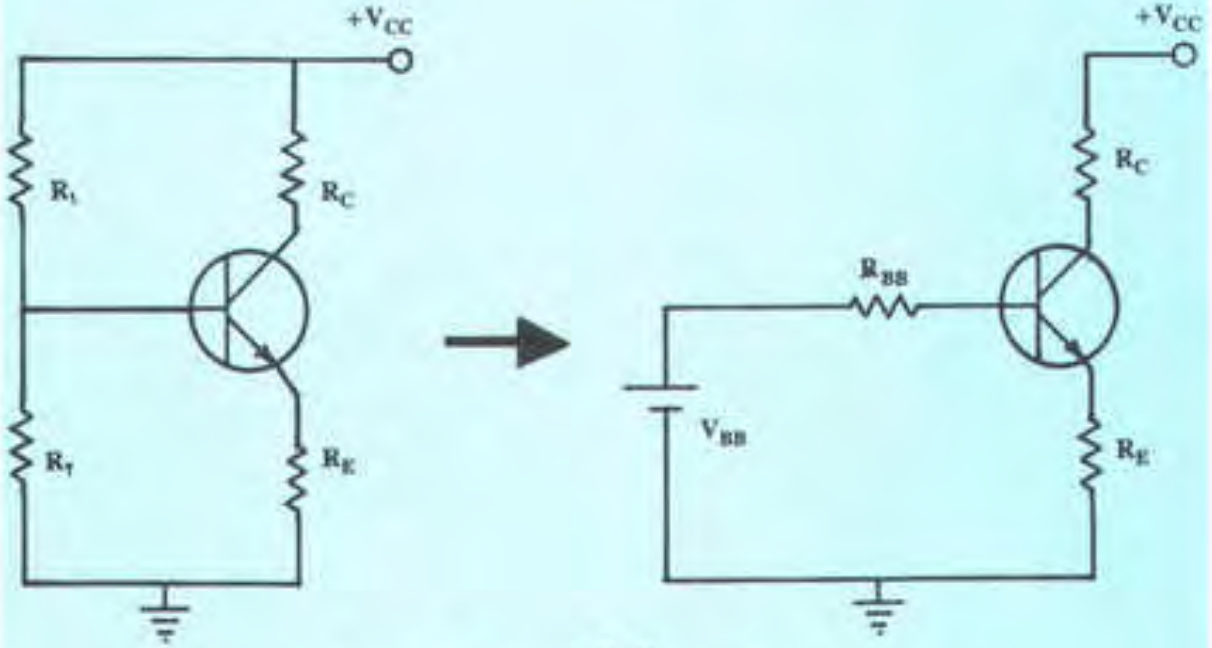
مثال ۵ ـ ۵ : با توجّه به مدار شکل (۳۸ـ۵) ، اگر $R_B = ۵۸K\Omega$ و $R_C = ۱/۱۷۶K\Omega$ و $\beta = ۵۰$ باشد Si را به دست آورید .

$$si = \frac{۱}{۱-\alpha\dfrac{R_B}{R_C+R_B}}$$

$$si = \frac{۱}{۱-۰/۹۸\dfrac{۵۸}{۱/۱۷۶+۵۸}} = ۲۵/۳۳۲$$

$$\boxed{si = ۲۵}$$

۳ـ۱۳ ـ ۵ـ محاسبهٔ پایداری حرارتی مدار بایاس سرخود : در اینجا ، بهتر است مدار معادل تونن شکل (۳۹ـ۵) را به دست آورده ، سپس با استفاده از مدار معادل ، معادلات لازم نوشته شود .



$$R_{th} = R_1 \| R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_{BB}$$

$$V_{th} = V_{R_2} = V_{CC} - V_{R_1} = V_{BB}$$

ب ـ مدار معادل بایاس سرخود　　الف ـ مدار بایاس سرخود

شکل (۳۹ـ۵) ترانزیستور با تغذیه سرخود و مدار معادل آن

با توجّه به حلقهٔ ورودی در مدار معادل ، می توان نوشت :

$$-V_{BB} + I_B R_{BB} + V_{BE} + I_E R_E = 0$$

$$-V_{BB} + I_B R_{BB} + V_{BE} + (I_C + I_B) R_E = 0$$

از I_B فاکتور می گیریم .

$$I_B(R_{BB} + R_E) = V_{BB} - V_{BE} - I_C R_E$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE} - I_C R_E}{R_{BB} + R_E}$$

قبلاً داشتیم :

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CO}$$

I_B را در رابطهٔ فوق قرار می دهیم .

$$I_C = \beta \frac{V_{BB} - V_{BE} - I_C R_E}{R_{BB} + R_E} + (1 + \beta) I_{CO}$$

$$I_C - \beta \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_{BB} + R_E} + \beta \frac{I_C R_E}{R_{BB} + R_E} - (1 + \beta) I_{CO} = 0$$

از I_C فاکتور می گیریم .

$$I_C(1+\beta\frac{R_E}{R_{BB}+R_E}) = \beta\frac{V_{BB}-V_{BE}}{R_{BB}+R_E} + (1+\beta)I_{CO}$$

$$I_C = \frac{\beta\frac{V_{BB}-V_{BE}}{R_{BB}+R_E} + (1+\beta)I_{CO}}{1+\beta\frac{R_E}{R_{BB}+R_E}} = \frac{\beta\frac{V_{BB}-V_{BE}}{R_{BB}+R_E}}{1+\beta\frac{R_E}{R_{BB}+R_E}} + \frac{1+\beta}{1+\beta\frac{R_E}{R_{BB}+R_E}}I_{CO}$$

از رابطهٔ فوق نسبت به I_{CO} ، مشتق می گیریم .

$$si = \frac{\Delta I_C}{I_{CO}} = 0 + \frac{1+\beta}{1+\beta\frac{R_E}{R_{BB}+R_E}} \times 1$$

حال ، به جای β مقدار آن ($\frac{\alpha}{1-\alpha}$) را قرار می دهیم .

$$si = \frac{1+\frac{\alpha}{1-\alpha}}{1+\frac{\alpha}{1-\alpha}\cdot\frac{R_E}{R_{BB}+R_E}} = \frac{\frac{1}{1-\alpha}}{\frac{(1-\alpha)(R_{BB}+R_E)+\alpha R_E}{(1-\alpha)(R_{BB}+R_E)}}$$

$$si = \frac{1}{\frac{(1-\alpha)(R_{BB}+R_E)+\alpha R_E}{R_{BB}+R_E}} = \frac{1}{\frac{R_{BB}+R_E-\alpha R_{BB}-\alpha R_E+\alpha R_E}{R_{BB}+R_E}}$$

$$\boxed{si = \frac{1}{1-\frac{\alpha R_{BB}}{R_{BB}+R_E}}}$$

مثال ۶ـ۵ : برای مدار شکل (۳۹ـ۵) اگر $\beta = 50$ و $R_C = 1K$ و $R_E = 0/2K$ و $R_1 = 18K$ و $R_2 = 2/44K$ باشد ، مقدار Si را بدست آورید .

حل : ابتدا ، مقدار R_{BB} را به دست می آوریم .

$$R_{BB} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_{BB} = \frac{۱۸ \times ۲/۴۴}{۱۸ + ۲/۴۴} = ۲/۱۴K\Omega \qquad \text{و} \qquad \alpha = ۰/۹۸$$

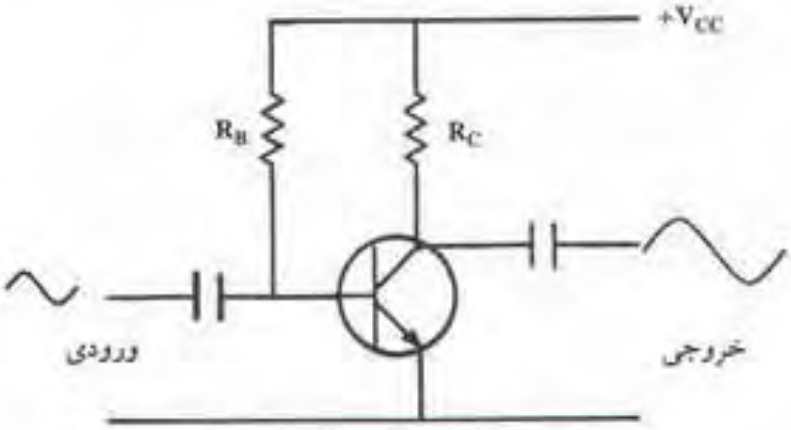
$$si = \frac{۱}{۱ - \frac{۰/۹۸ \times ۲/۱۴}{۲/۱۴ + ۰/۲}} = ۹/۶۳۷$$

$$\boxed{si = ۱۰}$$

از مقایسه ضرایب پایداری ، ملاحظه می شود که بایاس سرخود ، بهترین حالت است زیرا در این حالت Si کوچکترین مقدار را دارد .

۱۴ ـ ۵ ـ بررسی مدار عملی و مشخّصات یک تقویت کننده

برای اینکه بتوانیم یک سیگنال الکتریکی را از لحاظ دامنه یا جریان ، تقویت نماییم ، باید ابتدا تقویت کننده را از نظر ولتاژ DC (یکی از انواع بایاسینگ) تغذیه نموده ، سپس سیگنال را به ورودی وصل کنیم و از خروجی تقویت کننده ، سیگنال تقویت شده را دریافت نماییم . شکل (۴۰ـ ۵) مدار یک تقویت کنندهٔ ساده را نشان می دهد .



شکل (۴۰ـ۵) مدار عملی یک تقویت کننده

۱ـ ۱۴ـ۵ـ ضریب بهرهٔ ولتاژ و جریان: طبق تعریف، نسبت ولتاژ خروجی به ورودی را ضریب بهرهٔ ولتاژ می نامند و آن را با A_V نمایش می دهند و نسبت جریان خروجی به ورودی را ضریب بهرهٔ جریان نامیده، آن را با A_i نمایش می دهند که با اندازه گیری I_i ، I_o ، V_i و V_o به سادگی این ضرایب به دست می آیند :

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} \qquad \text{و} \qquad A_i = \frac{I_o}{I_i}$$

مشخّص بودن این ضرایب ، نشان می دهد که تقویت کننده ، جریان یا ولتاژ را چند برابر تقویت می کند .

۲ـ۱۴ـ۵ـ امپدانس ورودی و خروجی : چنانکه می دانیم ، برای اینکه حداکثر توان از یک طبقه به طبقهٔ دیگر انتقال داده شود ، باید امپدانس خروجی طبقهٔ اول با امپدانس ورودی طبقه بعدی ، برابر باشد . لذا دانستن امپدانسهای ورودی و خروجی در تقویت کننده ها ، اهمیّت زیادی دارد . امپدانس ورودی ، با اندازه گیری V_i و I_i با استفاده از قانون اهم به راحتی محاسبه می شود . یعنی :

$$R_i = \frac{V_i}{I_i}$$

و حال آنکه ، برای محاسبهٔ امپدانس خروجی ، یکبار ، خروجی را بدون بار (V_{OO}) و بار دیگر با بار (V_{OL}) اندازه می گیرند . سپس با داشتن این دو ولتاژ و مقدار بار (R_L) مقدار R_O از رابطهٔ زیر به دست می آید :

$$R_o = \frac{(V_{oo} - V_{oL})R_L}{V_{oL}}$$

در شکل (۴۰ـ۵) خازنهایی که در مسیر سیگنالهای ورودی و خروجی قرار گرفته اند ، مانع از عبور مقادیر ولتاژ و جریان dc از طبقه ای به طبقهٔ دیگر می شوند و فقط سیگنال متناوب را عبور می دهند . ظرفیّت این خازنها برای فرکانسهای کم (صوتی) حدود میکروفاراد می باشد . نکته قابل توجّه این است که سیگنال خروجی در اینجا همان ولتاژ V_{CE} می باشد ، ضمن اینکه بین سیگنال ورودی و خروجی اختلاف فاز ۱۸۰ درجه وجود دارد . زیرا با توجّه به رابطهٔ

$$V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE}$$

اگر دامنهٔ سیگنال ورودی زیاد شود (در نیم سیکل مثبت) ، جریان بیس ـ امیتر زیاد شده ، در نتیجه جریان کلکتور افزایش پیدا می کند . لذا افت ولتاژ دو سر مقاومت R_C نیز زیاد می شود $(R_C.I_C)$ ، از آنجایی که مقدار V_{CC} ثابت می باشد به ناچار مقدار V_{CE} باید کم شود تا تساوی رابطه برقرار گردد .

زیاد
↑
زیاد ثابت
↑

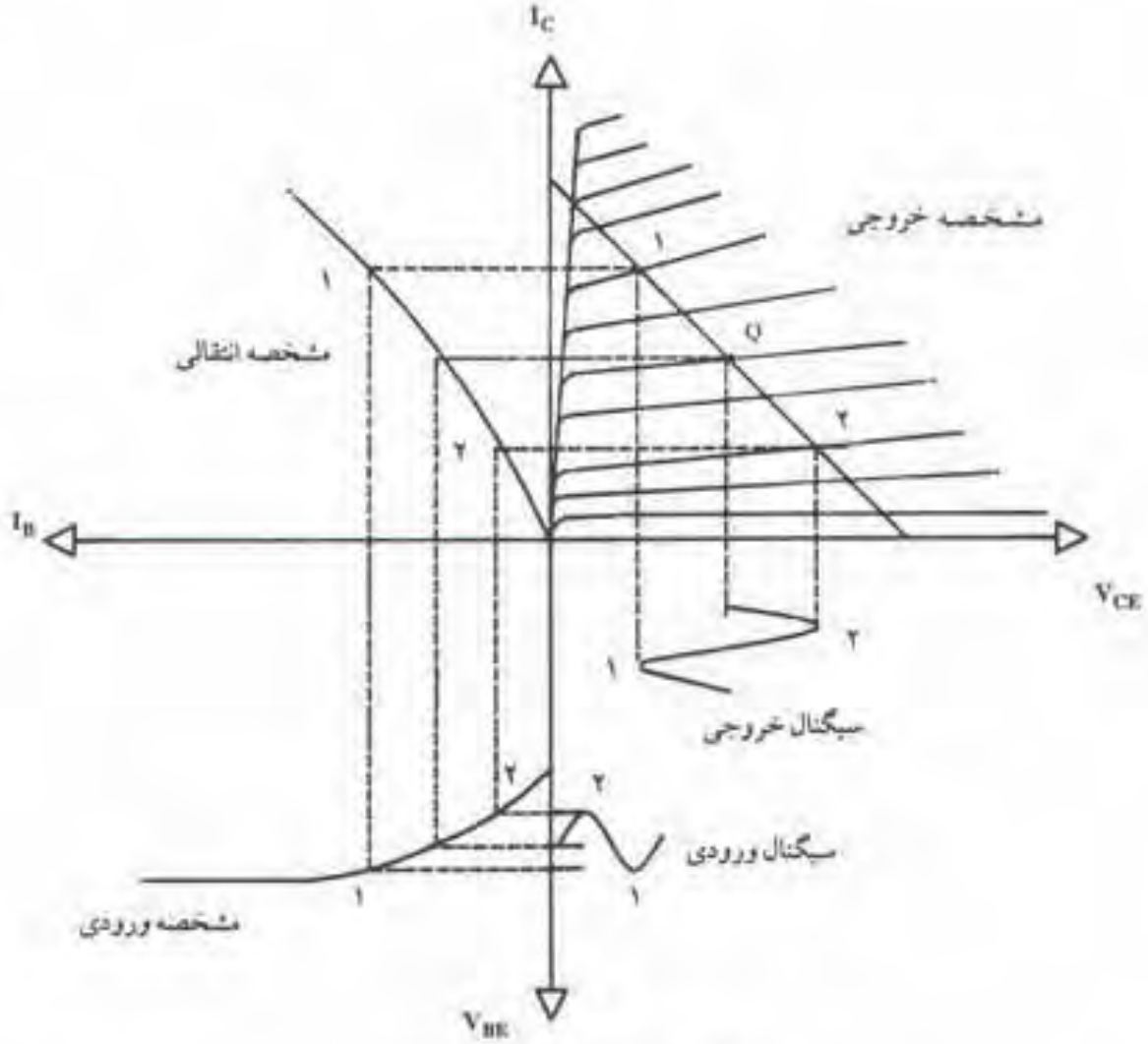
$$V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE}$$

ثابت ↓ کم

۱۵ ـ ۵ ـ بررسی تقویت یک سیگنال الکتریکی از روی منحنیهای مشخّصه

برای درک چگونگی تقویت سیگنال ، از روی منحنیهای مشخّصه ورودی ، انتقالی و خروجی با توجّه به نقطهٔ کار و خط بار به مطالب زیر توجّه کنید .

همانطوری که قبلاً گفته شد سیگنال ورودی به بیس ـ امیتر داده می شود . بنابراین ولتاژ V_{BE} یک ولتاژ متغیر ، حول نقطهٔ کار ورودی ، می شود . با تغییرات V_{BE} ، I_B نیز تغییر می کند . تغییرات I_B نیز سبب تغییرات I_C می شود ، همچنین تغییرات I_C ، تغییرات V_{CE} را به دنبال دارد که خروجی تقویت کننده است . شکل (۴۱ ـ ۵) مراحل تقویت را نشان می دهد .



شکل (۴۱ ـ ۵) نمایش مراحل تقویت

همانطور که دیده می شود در نیم سیکل مثبت ، زمانی که ولتاژ اضافه می شود (۱) دامنهٔ سیگنال خروجی (V_{CE}) کم می گردد ، لذا یک اختلاف فاز ۱۸۰ درجه بین سیگنال ورودی و خروجی به وجود می آید .

مطالب زیر را به خاطر بسپارید :

۱ ـ برای محاسبات مدارهای ترانزیستوری ، این روابط بسیار مهم هستند :

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{\beta}{\beta+1} \quad , \quad \beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad , \quad \gamma = \frac{I_E}{I_B} = \beta+1$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\gamma}$$

۲ ـ α همیشه کوچکتر از واحد و β و γ بزرگتر از واحد هستند .

۳ ـ تغذیهٔ ترانزیستور سبب می شود تا ترانزیستور در ناحیهٔ هدایت قرار گیرد .

۴ ـ جریان نشتی در بایاسینگ مستقیم به ترانزیستور صدمه می زند .

۵ ـ ضریب پایداری حرارتی در مدار بایاس سرخود ، از همه بهتر است .

۶ ـ قبل از اعمال سیگنال به تقویت کننده ، تغذیه DC ترانزیستور باید کامل باشد .

۷ ـ در آرایش امیتر مشترک ، بین سیگنال ورودی و خروجی ، ۱۸۰ درجه اختلاف فاز است .

۱۶ ـ ۵ ـ مقادیر حد در ترانزیستورها

هر المان نیمه هادی ، از جمله ترانزیستور ، برای مقادیر الکتریکی مشخّصی ساخته می شود . مثلاً هر ترانزیستور را برای تحمّل توان مشخّصی می سازند . اگر مقادیر الکتریکی ، بیش از آنچه که کارخانهٔ سازنده مشخص کرده است ، به ترانزیستور اعمال کنیم ، ترانزیستور معیوب می شود . این مقادیر الکتریکی به مقادیر حد معروفند . کارخانجات سازنده ، مقدار حدّ اکثر مجاز مقادیر الکتریکی را مشخّص می کنند . این مقادیر عبارتند از :

۱ ـ حدّاکثر ولتاژ کلکتور ـ امیتر (V_{CEmax}) ـ این پارامتر ، حدّاکثر ولتاژ مجاز بین پایه های کلکتور و امیتر را مشخّص می کند .

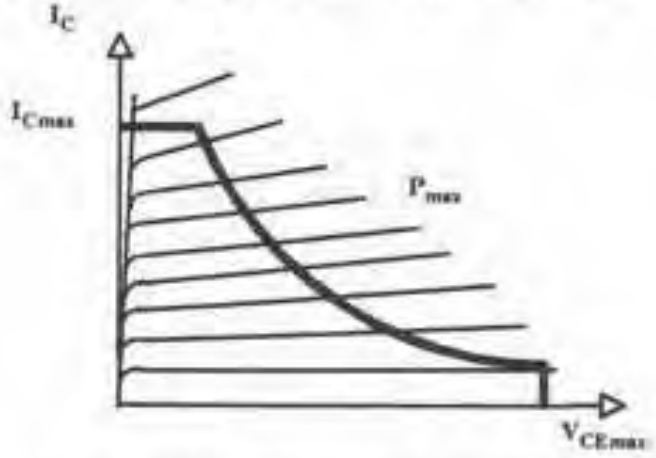
۲ ـ حدّاکثر جریان کلکتور (I_{Cmax}) ـ حدّاکثر جریانی است که ترانزیستور می تواند در دمای مشخّص شده از طرف کارخانهٔ سازنده ، تحمّل کند .

۳ ـ حدّاکثر توان (P_{max}) ـ مقدار توانی است که در ترانزیستور به صورت حرارت تلف می شود .

۴ ـ حدّاکثر درجه حرارت در محل پیوند (T_j) ـ حدّاکثر درجهٔ حرارتی است که در

محل اتصال کلکتور ـ بیس ، ترانزیستور می تواند تحمل کند .

۵ ـ فرکانس حد و فرکانس قطع ـ فرکانس حد (f_β) ، مقدار فرکانسی است که β به ازای آن به اندازه $\frac{۱}{\sqrt{۲}}$ یا ۳dB- کمتر از فرکانس (۰) هرتز می شود و فرکانس قطع (f_T) مقدار فرکانسی است که به ازای آن $\beta = ۱$ می شود . شکل (۴۲ـ۵) برای منحنی مشخصه خروجی مقادیر حد توان ، جریان کلکتور و ولتاژ کلکتور ـ امیتر مشخص شده است .



شکل (۴۲ـ۵) مقادیر حد برای منحنی مشخصه خروجی

۱۷ ـ ۵ ـ نامگذاری ترانزیستورها

برای نامگذاری ترانزیستورها ، سه روش مشهور در دنیا وجود دارد . گرچه تعدادی از کارخانجات در گوشه و کنار دنیا از سیستم نامگذاری خاصی استفاده می نمایند . آن سه روش ، عبارتند از :

ـ نامگذاری روش ژاپنی

ـ نامگذاری روش اروپایی

ـ نامگذاری روش آمریکایی

اینک نامگذاری هر یک از سه روش فوق توضیح داده خواهد شد .

۱ ـ ۱۷ ـ ۵ ـ نامگذاری روش ژاپنی : در این سیستم ، نامگذاری ترانزیستور را با عدد ۲ شروع کرده و به دنبال آن حرف S را می آورند . بعد از حرف و عدد ۲S ، یکی از چهار حرف C,B,A و D را قرار می دهند که هر یک مفاهیمی به شرح زیر دارند :

۱ ـ حرف A نشان دهنده ترانزیستور از نوع PNP بوده و در فرکانسهای بالا ، نیز می تواند کار کند[۱] (H.F) .

۱ـ High Frequency

۲ ـ حرف B نشان دهنده ترانزیستور از نوع PNP بوده و در فرکانسهای کم می تواند کارکند[1] (L.F) .

۳ ـ حرف C نشان دهنده ترانزیستور از نوعNPN بوده و در فرکانسهای بالا ، نیز می تواند کارکند .

۴ ـ حرف D نشان دهنده ترانزیستور از نوع NPN بوده و در فرکانسهای کم می تواند کارکند .

بعد از این حروف تعداد ۲ یا ۳ یا ۴ رقم عدد قرار می گیرد که با مراجعهٔ به جدول ، می توان مقادیر مشخّصه های الکتریکی آن را به دست آورد . در این سیستم ، حروف روی ترانزیستور ، مشخص کنندهٔ جنس نیمه هادی به کار رفته (ژرمانیم یا سیلیسیم) و همچنین حدود قدرت آن نمی باشد . مثلاً المان سه پایه به شماره ۲SC ۸۲۹ نشان دهندهٔ ترانزیستور از نوعNPN با محدوده فرکانسی بالا می باشد . لازم به تذکّر است که برروی اکثر ترانزیستورها ، حرف 2S را قید نمی نمایند ، مثلاً C۸۲۹ همان ۲SC۸۲۹ می باشد .

۲ ـ ۱۷ ـ ۵ ـ نامگذاری به روش اروپایی : در نامگذاری روش اروپایی ، تا سال ۱۹۶۰ ، ترانزیستور را با حرف OC و OD و با دو ، سه یا چهار عدد به دنبال آن مشخّص می کردند ، که OC برای ترانزیستورهای کم قدرت و OD برای ترانزیستورهای قدرت به کار می رفت . مانند : OCV۲ . در این روش نامگذاری ، نوع ترانزیستور (PNP ـ NPN) و یا جنس نیمه هادی به کار رفته و یا محدودهٔ فرکانسی آن مشخّص نبود .

از سال ۱۹۶۰ به بعد ، سیستم نامگذاری ترانزیستورها تغییر کرد . بدین نحو که ، ترانزیستورهای به کار رفته در رادیو و تلویزیون و یا در وسایل الکترونیکی عمومی بیشتر با دو حرف و سه شماره ، و ترانزیستورهای خاص ، با سه حرف و دو شماره مشخص می شوند . مانند ترانزیستور شماره BUX۳۸ که این ترانزیستور در فرکانسهای رادیویی با جریان و ولتاژ زیاد به کاربرده می شود . در این مبحث روش نامگذاری با دو حرف و سه شماره گفته خواهد شد .

حرف اوّل در این روش ، نشان دهنده جنس نیمه هادی است که اگر از ژرمانیم باشد با حرف A و اگر سیلیسیم باشد با حرف B مشخّص می نمایند .

حروف دوم را از حروف C ، D ، F ، L ، S ، ویا U استفاده می نمایند که معانی هر یک از این حروف به شرح زیر می باشد :

C : ترانزیستور کم قدرت ـ فرکانس کارکم .

۱ـ Low Frequency

D : ترانزیستور قدرت ـ فرکانس کارکم .

F : ترانزیستور کم قدرت ـ فرکانس کارزیاد .

L : ترانزیستور قدرت ـ فرکانس کارزیاد .

S : ترانزیستور کم قدرت به عنوان سوییچ به کار می رود .

U : ترانزیستور قدرت به عنوان سوییچ به کار می رود .

سه شماره بعد ، نشان دهنده سری ترانزیستور می باشد که با استفاده از این سه شماره و جدول مشخّصات ، می توان مشخّصات الکتریکی ترانزیستور را به دست آورد . به عنوان مثال مشخّصات ظاهری ترانزیستور BC۱۰۷ به این شرح است :

جنس ترانزیستور از سیلیکون می باشد=B

ترانزیستور کم قدرت بوده و در فرکانس کم می تواند کار کند=C

مشخّصات الکتریکی را با مراجعه به کتاب مشخّصات ترانزیستورو پیدا کردن جدول مربوط به دست می آورند . ویا مشخصات ظاهری ترانزیستور BF۴۸۰ ، ترانزیستور کم قدرت بوده ، جنس آن از سیلیسیم و بافرکانس زیاد ($1GH_z$) نیز می تواند کار کند . در این سیستم نامگذاری نوع ترانزیستور (PNP ـ NPN) از روی حروف ترانزیستور مشخّص نیست .

۳ ـ ۱۷ ـ ۵ ـ نامگذاری به روش امریکایی : در این روش نامگذاری ، ترانزیستور و المانهای سه قطبی را با حرف و عدد ۲N مشخّص می کنند و تعدادی رقم به عنوان شماره سری به دنبال آن می آورند . حرف N و عدد ۲ فقط المانهای سه قطبی را از المانهای دو قطبی (مانند دیود) مشخّص می سازد . با توجّه به شماره های بعدی که به دنبال آن می آورند و با توجّه به جدول مشخّصات المانها ، نوع المان و همچنین مشخّصات الکتریکی آن را باید به دست آورد . به عنوان مثال :

ترانزیستور قدرت (NPN) که درفرکانسهای کم کار می کند = ۲N۳۰۵۵

ترانزیستور تک اتّصالی (UJT) = ۲N۲۶۴۶

تریستور = ۲N۱۸۴۲

ترایاک = ۲N۶۱۳۹

می باشند .

تمرین : مشخّصات ظاهری را که می توان از ترانزیستورهای زیر به دست آورد ، بنویسید.

AC۱۷۸ – BD۱۳۶ – BF۲۰۹ – AF۱۳۹ – AD۱۶۹ – BU۱۱۲ – BC۱۰۹ –

۲SA۶۰۴ – ۲SB۵۴ – ۲SC۴۹۸ – ۲SD۶۷

۱۸ ـ ۵ ـ به دست آوردن مقادیر حد از جدول

همانطوری که در قسمت قبل توضیح داده شد در سیستم نامگذاری ژاپنی و اروپایی ، تعدادی از مشخّصات ترانزیستور به صورت حروف بر روی بدنهٔ آن درج می شوند . مثلاً در ترانزیستور BC۱۰۷ می توانستیم بفهمیم که توان این ترانزیستور کم بوده ، در فرکانس کم ، کار می کند ، امّا نمی توان فهمید که مثلاً قدرت و یا فرکانس حدّ آن چقدر است . برای یافتن مشخّصات کامل و شرایط کار نامی باید به منحنیها و جدولهایی که کارخانجات سازنده برای هر یک از ترانزیستورها می دهند مراجعه نمود .

در اینجا یک نمونه از جدولی که مشخّصات حدّ ترانزیستورها در آن درج است و به سادگی در بازار یافت می شود ، معرفی و طرز استفاده از آن گفته خواهد شد .

در این کتاب مشخصات ترانزیستورها Tower's International Transistor Selector می باشد . حدود ۲۰،۰۰۰ ترانزیستور آمریکایی ، اروپایی و ژاپنی آمده است . همچنین ضمن ارائه مشخّصات الکتریکی ، ابعاد و شکل ظاهری و پایه های ترانزیستور در آن مشخّص شده است . در ضمن ، نام کارخانه سازندهٔ تمامی ترانزیستورها در آن قیدشده ، در موارد زیادی ، مشابه ترانزیستور آمریکایی و ژاپنی نیز داده شده است .

چگونگی استفاده از کتاب در جدول (۱ـ۵) آمده است .

TRANSISTOR NUMBER	PM OA LT	PACK AGE	LEAD INFO	VCB MAX	VCE MAX	VEB MAX	I_C MAX	T_J MAX	P TOT	F_T MIN	C_{OB} MAX	H_{FE}	H_{FE} BIAS	USE	MFR	ELE SPEC	USA EQUIV	ISS
BC ۱۰۷	NS	TO ۱۸	L ۰۱	۵۰	۴۵	۶	۱۰۰ mA	۱۷۵ C	۳۰۰ m WF	۱۵۰ M	۵P	۱۱۰ MN	۲ mA	AL G	MUB	BC ۱۰۷	۲N ۹۲۹	-

نوع و شماره جنس ترانزیستور

ترانزیستور
N=NPN
P= PNP
سیلیسیم =S
ژرمانیم =G

شکل ظاهری و ابعاد مراجعه شود به ضمیمه C

اطلاعات مربوط به پایه‌های ترانزیستور ـ به ضمیمه B مراجعه شود

حداکثر ولتاژ کلکتور ـ بیس

حداکثر ولتاژ کلکتور ـ امیتر

حداکثر ولتاژ معکوس امیتر ـ بیس

حداکثر جریان کلکتور

حداکثر درجه حرارت مجاز محل پیوند بر حسب درجه سانتیگراد

حداکثر توان مجاز ترانزیستور C: باگرماگیر در هوای آزاد در ۲۵°C

MW = میلی وات F = در هوای آزاد در ۲۵°C

W = وات H : در هوای آزاد با گرما گیر فلزی

معادل امریکایی

معادل اروپایی

نام کارخانه سازنده به ضمیمه F مراجعه شود

کاربرد ـ به ضمیمه A مراجعه شود

ضریب تقویت جریان به ازای این جریان بایاس

حداکثر ظرفیت خازن بین لایه بیس و کلکتور
P = پیکو فاراد
N = نانو فاراد

فرکانس قطع ترانزیستور
مگاهرتز = M
کیلوهرتز = K گیگاهرتز = G

جدول (۱ـ۵)

پرسش

۱ـ ترانزیستور در چه سالی و توسّط چه کسانی اختراع گردید؟

۲ـ برتریهای استفاده از ترانزیستور به جای لامپ را نام ببرید .

۳ـ ساختمان ترانزیستور را توضیح دهید .

۴ـ بایاسینگ ترانزیستور را شرح دهید .

۵ـ چگونگی عمل تقویت توسّط ترانزیستور را بنویسید .

۶ـ در مورد چگونگی انتخاب نام ترانزیستور توضیح دهید .

۷ـ نمای ساختمانی ، سمبلیک و دیودی ترانزیستور را رسم کنید .

۸ـ جهت جریان در ترانزیستور را شرح دهید .

۹ـ I_{CO} را توضیح دهید .

۱۰ـ آرایشهای ترانزیستور را نام ببرید و علّت نامگذاری هر یک را بنویسید .

۱۱ـ رابطهٔ بین ولتاژهای پایه های ترانزیستور را بنویسید .

۱۲ـ منحنی مشخّصه های ترانزیستور را نام ببرید .

۱۳ـ از روی منحنی مشخّصه ، چه خصوصیّاتی را می توان دریافت کرد ؟ توضیح دهید .

۱۴ـ مشخّصات مناطق قطع ، فعّال و اشباع را بنویسید .

۱۵ـ در مورد تأمین ولتاژ و جریانهای مورد نیاز ترانزیستور ، توضیح دهید .

۱۶ـ نقطهٔ کار را تعریف کنید و چگونگی انتخاب آن را بنویسید .

۱۷ـ خط بار را تعریف کنید و نحوهٔ محاسبه آن را توضیح دهید .

۱۸ـ α و β و γ را تعریف کنید .

۱۹ـ α را بر حسب β و γ و بر عکس به دست آورید .

۲۰ـ مقاومتهای بایاسینگ سرخود را ، در یک مدار CE به دست آورید .

۲۱ـ رابطهٔ حرارت یا تغییرات جریان نشتی و جریان کلکتور را توضیح دهید .

۲۲ـ مدار معادل تونن مداری با تغذیه سرخود را رسم کنید و مقادیر R_{BB} و V_{BB} را به دست آورید .

۲۳ـ ضریب حرارتی در کدام نوع بایاسینگ ، از همه بهتر است ؟

۲۴ـ مقادیر حدّ در ترانزیستور را نام ببرید .

۲۵ـ روش نامگذاری ترانزیستور به روش اروپایی را شرح دهید .

فصل ششم

تقویت کننده های ترانزیستوری

هدفهای رفتاری : فراگیر درپایان این فصل خواهد توانست :

۱ ـ تقویت کننده‌ها را از نظر کاربرد فرکانس و انواع آن توضیح دهد.

۲ ـ کلاسهای تقویت کننده را شرح دهد.

۳ ـ پارامترهای h یک تقویت کننده را نام ببرد.

۴ ـ پارامترهای h را به دست آورد.

۵ ـ کمیّتهای حاصل از یک تقویت کننده را نام ببرد.

۶ ـ A_i ، A_v و R_i و R_o و A_p را با استفاده از پارامترهای h محاسبه نماید.

۷ ـ تقویت کننده CE را بررسی کند ومقاومتهای بایاس و بهره جریان ، بهره ولتاژ ، R_i و R_o را محاسبه نماید.

۸ ـ تقویت کنندهٔ CB را بررسی و مقاومتهای بایاس ، بهره جریان ، بهره ولتاژ ، R_i و R_o را محاسبه نماید.

۹ ـ تقویت کننده CC را بررسی ومقاومتهای بایاس ، بهره جریان ، بهره ولتاژ ، R_i و R_o را محاسبه کند.

۱۰ ـ هرسه آرایش را مقایسه و کاربرد هر یک را توضیح دهد.

تقویت کننده‌ها را از دیدگاههای مختلف از جمله : کاربرد فرکانس ، کمیّت مورد تقویت ، قدرت و . . . طبقه بندی می کنند .

۱ ـ۶ ـ کاربرد فرکانس

تقویت کننده ها از لحاظ کاربرد فرکانس به چهار دسته (صفحه بعد) تقسیم می شوند. محدودهٔ فرکانس کار هر طبقه ، مشخّص می باشد.

۱ ـ تقویت کنندهٔ جریان مستقیم .

۲ ـ تقویت کنندهٔ فرکانس صوتی .

۳ ـ تقویت کنندهٔ فرکانس تصویری .

۴ ـ تقویت کنندهٔ فرکانس رادیویی و بالاتر .

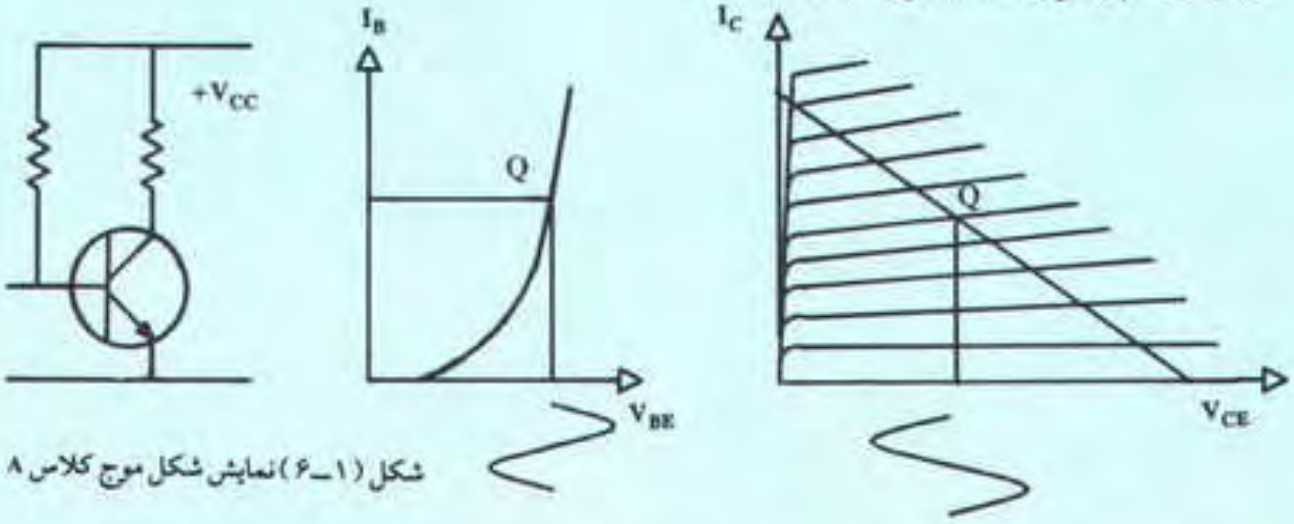
فرق مهمی که بین این تقویت کننده ها وجود دارد ، نوع کوپلاژی (کوپلاژ مستقیم، خازنی و سلفی) است که بین دو طبقهٔ تقویت کننده به کار می رود .

۲ ـ ۶ ـ کمیّت مورد تقویت

دراین باره باید گفت که تقویت کننده ، چه چیزی را می‌خواهد تقویت کند . منظور این است که آیا این تقویت کنندهٔ جریان است یا تقویت کنندهٔ ولتاژ ویا قدرت ؟

۳ ـ ۶ ـ بررسی تقویت کننده های کلاس A ، B ، AB ، C

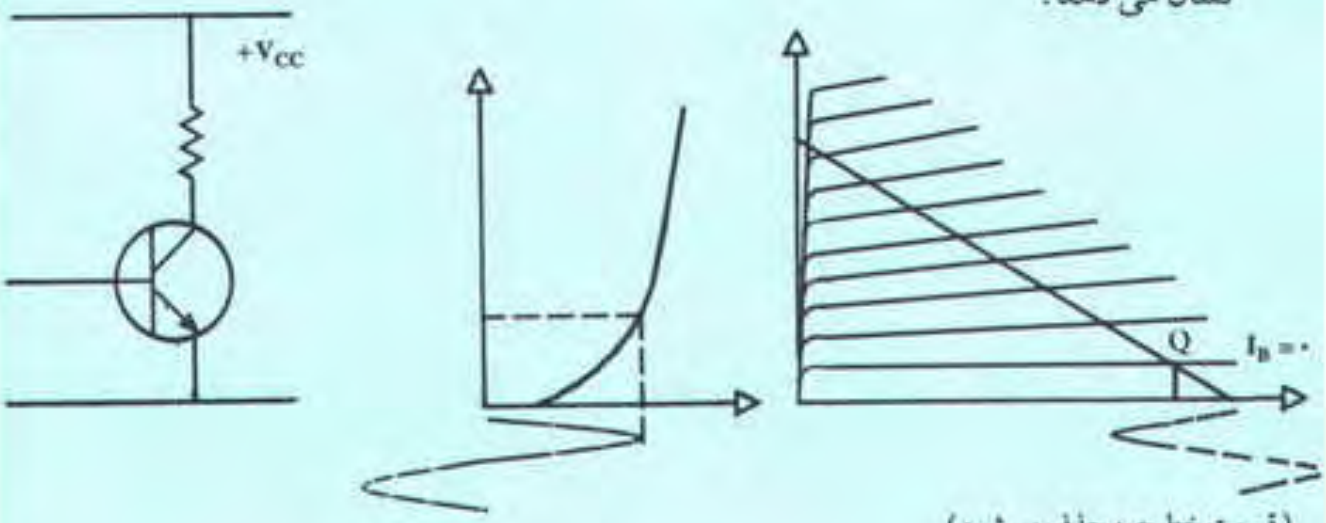
۱ ـ ۳ ـ ۶ ـ تقویت کننده کلاس A :در این تقویت کننده ، سیگنال الکتریکی از دوطرف مثبت و منفی ، به یک اندازه تقویت می شود . نقطه کار ترانزیستور ، باید طوری انتخاب شود که هیچ قسمتی از سیگنال (مثبت یا منفی) حذف نشود . در این حالت معمولاً مقدار V_{CE} را نصف V_{CC} انتخاب می نمایند . شکل (۱ ـ ۶) تقویت کنندهٔ کلاس A ، نقطهٔ کار ورودی روی منحنی مشخّصه ورودی ، نقطهٔ کارخروجی روی منحنی مشخّصه خروجی را نشان می دهد .



شکل (۱ـ۶) نمایش شکل موج کلاس A

۲ ـ ۳ ـ ۶ ـ تقویت کنندهٔ کلاس B : در این تقویت کننده ،سیگنال فقط از یک طرف تقویت خواهد شد . درضمن قسمت کمی حدود (۰/۶ ولت در ترانزیستور سیلیسیم)

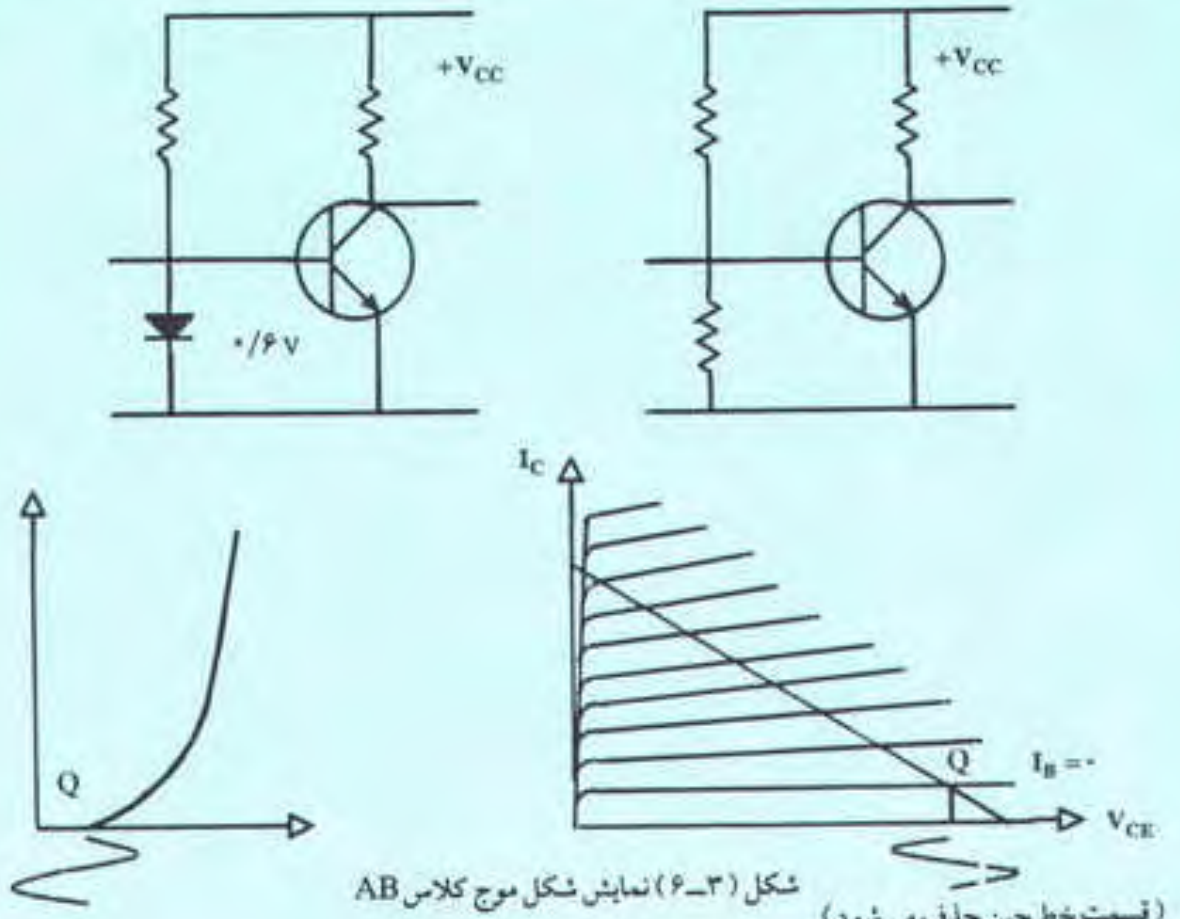
ابتدای سیگنال ، تقویت نخواهد شد . زیرا این تقویت کننده از نظر ولتاژ ، معمولاً بایاس نمی شود . شکل (۲ ـ ۶) مدار تقویت کنندهٔ کلاس B ، نقطهٔ کار ورودی و خروجی را نشان می دهد .



(قسمت خط چین حذف می شود)

شکل (۲ـ۶) نمایش شکل موج کلاس B

۳ـ۳ـ۶ـ تقویت کننده کلاس AB : این تقویت کننده نیز فقط سیکلهای مثبت یا منفی را تقویت می کند (تقویت نیم سیکل مثبت یا منفی ، بستگی به نوع ترانزیستور NPN یا

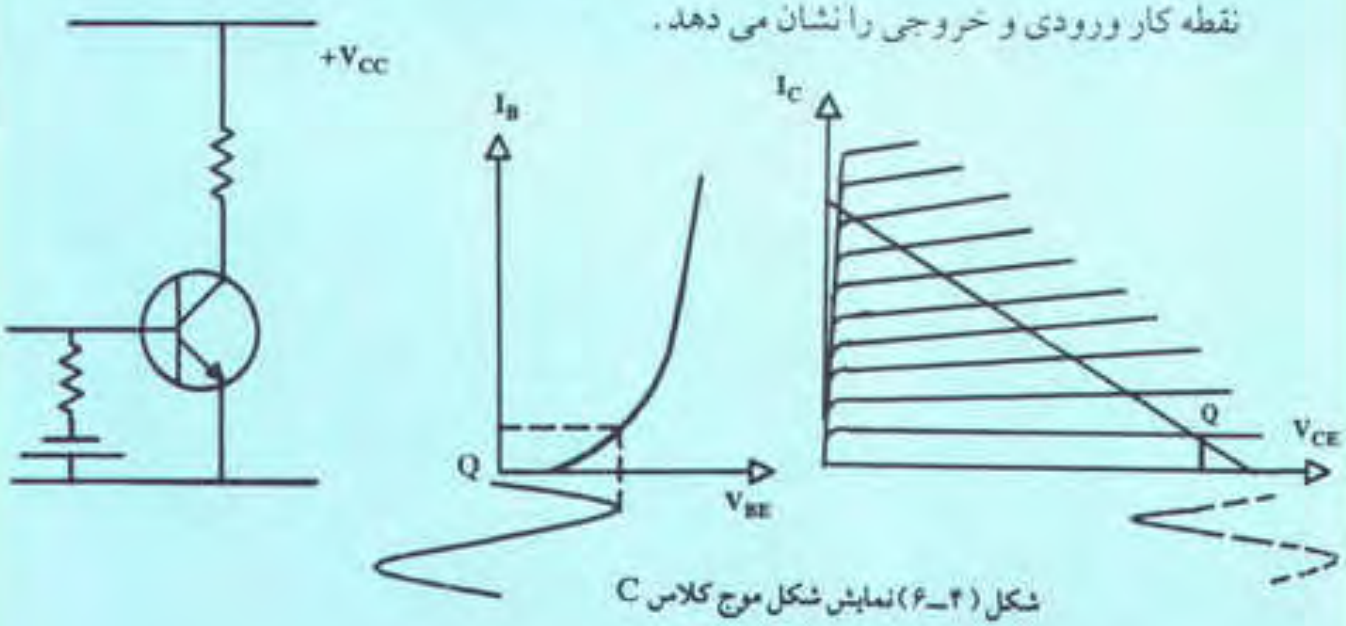


شکل (۳ـ۶) نمایش شکل موج کلاس AB

(قسمت خط چین حذف می شود)

PNP دارد) . فرق این تقویت کننده با کلاس B آن است که این تقویت کننده را حدود ۰/۶ ولت بایاس می کنند و تقریباً تمامی قسمت سیکل مثبت یا منفی ، تقویت می شود . شکل (۳ـ ۶) مدار تقویت کننده کلاس AB ، نقطهٔ کارورودی و نقطهٔ کار خروجی را نشان می دهد .

۴ـ۳ـ ۶ـ تقویت کنندهٔ C : در این تقویت کننده ، فقط قسمت کمی از نیم سیکل مثبت یا منفی (بسته به نوع ترانزیستور NPN و PNP) تقویت می شود . بایاسینگ بیس ـ امیتر معمولاً بطور معکوس انجام می گیرد . شکل (۴ ـ ۶) مدار تقویت کننده کلاس C ، نقطه کار ورودی و خروجی را نشان می دهد .



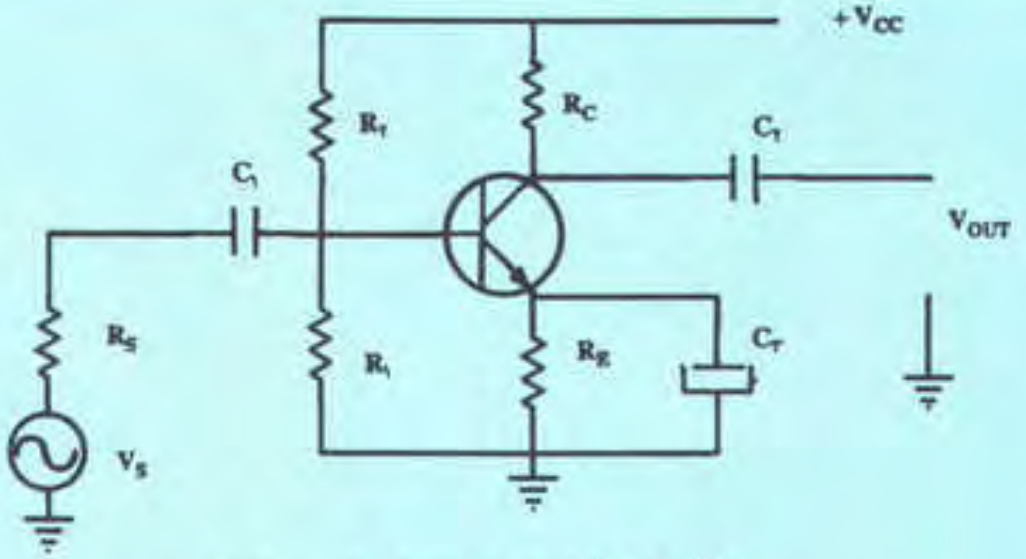
شکل (۴ـ۶) نمایش شکل موج کلاس C

۴ ـ ۶ ـ بررسی مدار معادل AC یک تقویت کننده

مدار معادل ترانزیستور از عناصر مختلفی تشکیل شده است که عملکرد واقعی ترانزیستور را در ناحیهٔ کار مشخّص ، شبیه سازی (به صورت ساده تری نشان می دهد) می کند . هنگامی که این مدار معادل برای ترانزیستوری به دست آورده شود ، می توان آن را در مدار ، جایگزین ترانزیستور کرد وسپس با استفاده از روشهای اساسی تحلیل مدارهای AC (روش جریان شاخه ، حلقه ، نقطه گره ، تونن و نورتون) پاسخهای لازم را به دست آورد .

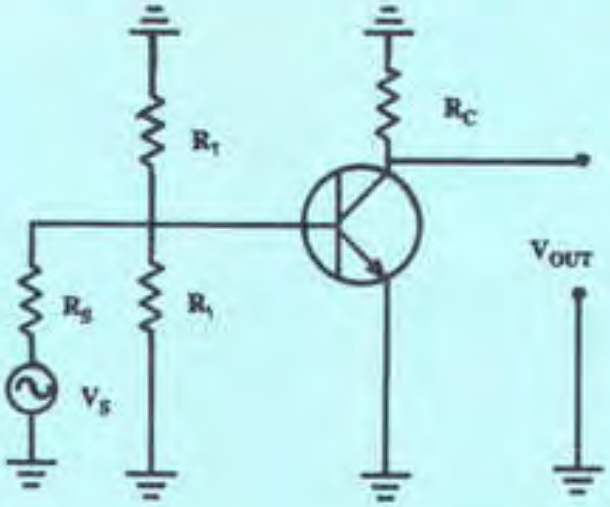
۱ ـ ۴ ـ ۶ ـ مدار معادل ترانزیستور با استفاده از پارامترهای h[۱] : ابتدا ، ترانزیستور را مطابق شکل (۵ـ۶) ، در ناحیهٔ فعّال بایاس کرده ، سپس سیگنال را به ورودی اعمال می کنیم .

۱ ـ Hybrid Paramenters



شکل (۵ـ۶) یک تقویت کننده CE بایاس سرخود

چون، می‌خواهیم کارکرد مدار را فقط برای سیگنال AC بررسی کنیم ، بنابراین ، می توان همهٔ منابع DC را متّصل به زمین (اتّصال کوتاه) در نظر گرفت . زیرا این منابع فقط سطوح DC خروجی را تعیین می کنند و در مقدار تغییرات دامنهٔ خروجی AC تأثیر ندارند. علاوه بر این ، مقادیر خازنهای کوپلاژ C_1 ، C_2 و C_3 ، طوری در نظر گرفته می شوند که برای فرکانس سیگنال ورودی، راکتانس بسیار کمی داشته باشند. بنابراین خازنها را نیز می توان اتّصال کوتاه در نظر گرفت . به طور کلّی مدار را از لحاظ AC، می توان مثل شکل (۶ـ۶) ترسیم کرد.



شکل (۶ـ۶) نمایش مدار از نظر AC

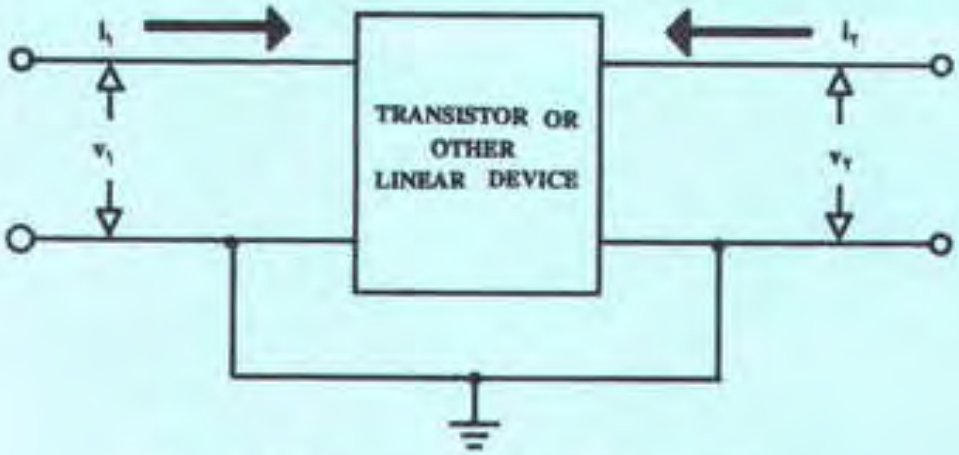
در این مدار، مقاومت R_E اتّصال کوتاه ومقاومتهای R_1 و R_2 در ورودی با هم موازی شده‌اند. مقاومت R_C بین کلکتور و امیتر قرار می گیرد. مدار معادل AC تقویت‌ـ

کنندهٔ فوق را مانند شکل (۷ـ ۶) نیز می توان ترسیم کرد .

شکل (۷ـ۶) مدار معادل AC تقویت کنندهٔ CE

در مدار فوق ، جریان ورودی و خروجی ، به صورت $I_{in} = I_B$ ، $I_{out} = I_C$ و امپدانس ورودی و خروجی ، به صورت $Z_{in} = Z_i$ ، $Z_{out} = Z_o$ نمایش داده شده ، محاسبه می گردند .

اکنون ، با تعیین کمیّتهای فوق ، مدار معادل و پارامترهای h را به دست می آوریم . در فرکانسهای پایین ، ترانزیستور به صورت یک قوطی در نظرگرفته می شود که هیچ اطّلاعی از محتویات آن در دست نیست . از این قوطی ، مانند شکل (۸ ـ ۶) چهار سر بیرون آمده که دو سر آن ورودی و دو سر دیگر خروجی می باشد .



شکل (۸ـ۶) نمایش ترانزیستور به صورت یک قوطی چهارسر

البتّه چون ترانزیستور سه سر و قوطی چهار سر دارد ، کافیست یک سر ورودی قوطی را به یک سرِ خروجی آن وصل کنیم تا شباهت قوطی و ترانزیستور تکمیل شود . سر مشترک ورودی وخروجی ، به زمین وصل می شود . ملاحظه می کنید که برای هرجفت

سر، دو متغیّر جریان و ولتاژ در نظر گرفته شده است. پارامترهایی که این چهار متغیّر (I_1 ، V_1 و I_2 ، V_2) را به هم مربوط می سازد پارامتر h می نامند. روشهای مختلفی برای بیان ارتباط بین این چهار متغیّر وجود دارد که یکی از آن روشها، دستگاه معادلات است و به صورت زیر معرفی می شود.

دستگاه معادلات

$$\begin{cases} V_1 = h_{11}I_1 + h_{12}V_2 & (1) \\ I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}V_2 & (2) \end{cases}$$

برای اینکه درک روشنی از پارامترهای h داشته باشیم و بدانیم که این پارامترها معرّف چه کمیّتی هستند و چگونه می توان آنها را به کار برد، هریک از آنها را جداگانه مورد بررسی قرار می دهیم.

اگر در رابطهٔ (۱)، یعنی : $V_1 = h_{11}I_1 + h_{12}V_2$ مقدار V_2 را مساوی صفر قرار دهیم (سرهای خروجی را اتّصال کوتاه کنیم) از این رابطه، مقدار h_{11} به دست می آید.

$$\left.\begin{aligned} V_1 &= h_{11}I_1 \\ h_{11} &= \frac{V_1}{I_1} \end{aligned}\right| V_2 = 0$$

h_{11} یک پارامتر امپدانسی است و با واحداهم اندازه گیری می شود.

اگر در رابطهٔ (۱)، I_1 را مساوی صفر قرار دهیم (سرهای ورودی را باز نماییم) در این صورت h_{12} به دست می آید.

$$\left.\begin{aligned} V_1 &= 0 + h_{12}V_2 \\ h_{12} &= \frac{V_1}{V_2} \end{aligned}\right| I_1 = 0$$

h_{12} بدون واحد است و نسبت ولتاژ ورودی به ولتاژ خروجی است درصورتی که جریان ورودی صفر باشد. به h_{12} نسبت انتقال معکوس ولتاژ مدار باز نیز می گویند.

واژهٔ معکوس به این دلیل به کار رفته که این پارامتر، نسبت ولتاژ ورودی به خروجی است نه خروجی به ورودی، که معمولاً درمدارها مورد نظر می باشد.

اگر در رابطهٔ (۲)، یعنی : $I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}V_2$ مقدار V_2 را مساوی صفر قرار دهیم، در این صورت مقدار h_{21} بدست می آید.

$$\left.\begin{aligned} I_2 &= h_{21}I_1 + 0 \\ h_{21} &= \frac{I_2}{I_1} \end{aligned}\right| V_2 = 0$$

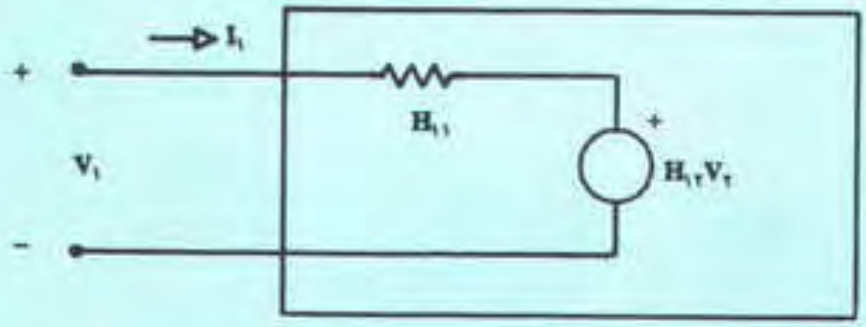
با دقّت در رابطهٔ h_{21} ملاحظه می شود که، نسبت جریان خروجی به جریان ورودی را نشان می دهد که بدون واحد است و به آن پارامتر نسبت انتقال مستقیم جریان اتّصال کوتاه خروجی می گویند و در اکثر موارد مهمترین پارامترها می باشد.

اگر در رابطه (۲) ، مقدار I_1 را برابر صفر قرار دهیم ، مقدار h_{22} بدست می آید .

$$\left.\begin{aligned} I_2 &= 0 + h_{22}V_2 \\ h_{22} &= \frac{I_2}{V_2} \end{aligned}\right| I_1 = 0$$

چون ، این پارامتر نسبت جریان خروجی به ولتاژ خروجی را مشخص می کند به آن هدایت خروجی مدار باز می گویند و با واحد مو (mho) سنجیده می شود .

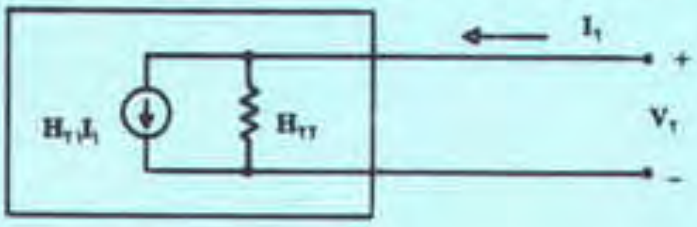
هریک از جملات رابطهٔ $V_1 = h_{11}I_1 + h_{12}V_2$ از جنس ولتاژ است و به صورت مجموع ولتاژها نوشته شده‌اند لذا با به کار بردن KVL، به طور معکوس ، می‌توان مداری ترسیم کرد که این رابطه در آن صدق نماید . شکل (۹ـ۶) این مدار را نشان می دهد .



شکل (۹ـ۶) مدار معادل در ورودی

در شکل (۹ـ۶) h_{11} به صورت مقاومت و h_{12} بدون واحد است و فیدبک ولتاژ خروجی را در مدار نشان می‌دهد .

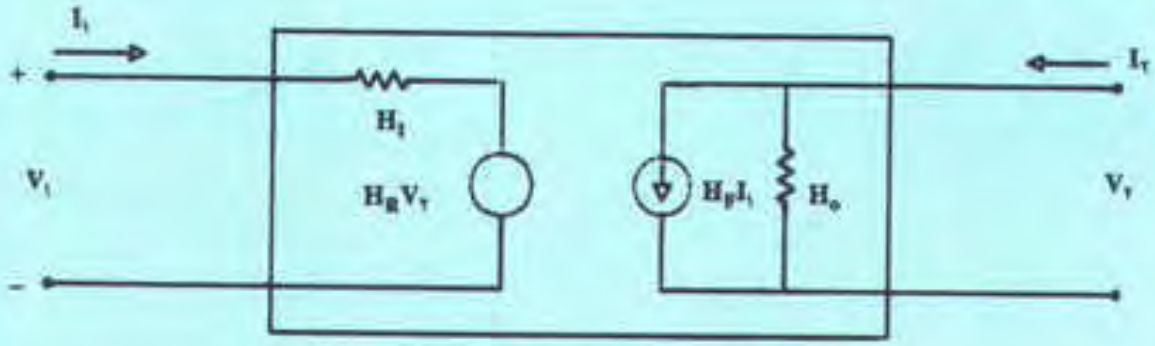
با توجّه به رابطهٔ $I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}V_2$ ملاحظه می شود که جملات این رابطه ، همگی از جنس جریان هستند و با به کاربردن KCL به طورمعکوس ، می‌توان مداری ترسیم کرد که این رابطه در آن صدق کند . شکل(۱۰ـ۶) این مدار را نشان می‌دهد .



شکل (۱۰ـ۶) مدار معادل در خروجی

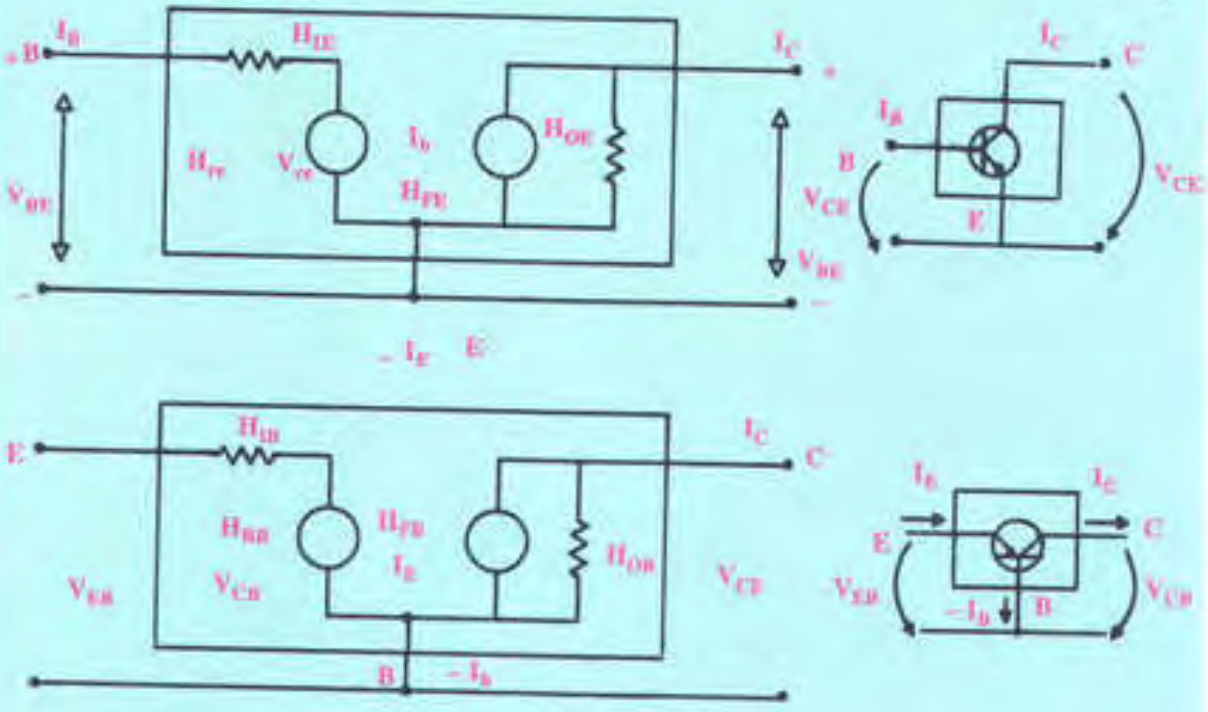
چون h_{22} ، دارای واحدِ هدایت است به صورت مقاومت و h_{21} به صورت منبع جریان نشان داده شده است . مدار معادل کامل AC یک وسیله خطّی در شکل (۱۱ـ۶)

نشان داده شده است .



شکل (۱۱ـ۶) مدار معادل کامل AC یک وسیله خطی

مدار معادل کامل AC برای ترانزیستور ، در سه آرایش (CC، CB، CE) به کار برده می‌شود. برای هر ترکیب ، پارامترهای h متفاوت خواهد بود. هر پارامتر h دارای دو اندیس است که اندیس اول کمیّت مورد اندازه گیری و اندیس دوم نوع آرایش آن را ، معرفی می کند. شکل (۱۲ ـ۶) مدار معادل AC ترانزیستوربا آرایشهای CE وCB را نشان می دهد.



شکل (۱۲ـ۶) مدار معادل AC آرایشهای امیتر مشترک و بیس مشترک

نامگذاری به کار رفته در شکل، از نظر کاربرد عملی مناسبتر است . انتخاب حروف اندیس اول طبق روش صفحهٔ بعد انجام گرفته است :

امپدانس ورودی

i = Input h_i = Input Resistance

نسبت انتقال جریان مستقیم

f = Forward h_f = Forward Transfer Current Ratio

نسبت انتقال ولتاژ معکوس

r = Reverse h_r = Reverse Transfer Voltage Ratio

هدایت خروجی

o = Output h_o = Output Conductance

اندیس دوم ، برای CE حرف e و برای CB حرف b وبرای CC حرف c در نظر گرفته شده است .

در جدول (۱ـ۶) مقادیر تقریبی پارامترهای h یک ترانزیستور ژرمانیم ، برای سه حالت CE ، CB وCC داده شده است .

	CE	CB	CC
امپدانس ورودی	h_{ie} (۱۴۰۰Ω)	h_{ib} (۳۱Ω)	h_{ic} (۱۴۰۰Ω)
نسبت انتقال جریان مستقیم	h_{fe} (۴۴)	h_{fb} (۰/۹۸۷)	h_{fc} (۴۴)
نسبت انتقال ولتاژ معکوس	h_{re} $۳/۳۷\times۱۰^{-۴}$	h_{rb} (۵×۱۰^{-۴})	h_{rc} (۱)
هدایت خروجی	h_{oe} $(۲۷\times۱۰^{-۶}$ mho)	h_{ob} $(۰/۶\times۱۰^{-۶})$	h_{oc} $(۲۷\times۱۰^{-۶}$ mho)

جدول (۱ ـ ۶) پارامترهای h یک ترانزیستور ژرمانیم در سه حالت CB, CE و CC

از روی پارامترهای h می‌توان بهرهٔ جریان (A_i) ، بهرهٔ ولتاژ (A_V) ، بهرهٔ توان (A_p)،مقاومت ورودی(R_i)و مقاومت خروجی (R_o) را محاسبه کرد. درجدول (۲ـ۶) روابط لازم برای آرایش CE محاسبه شده است . در این جدول R_g مقاومت داخلی منبع سیگنال ورودی و R_L مقاومت بار در خروجی می باشد.

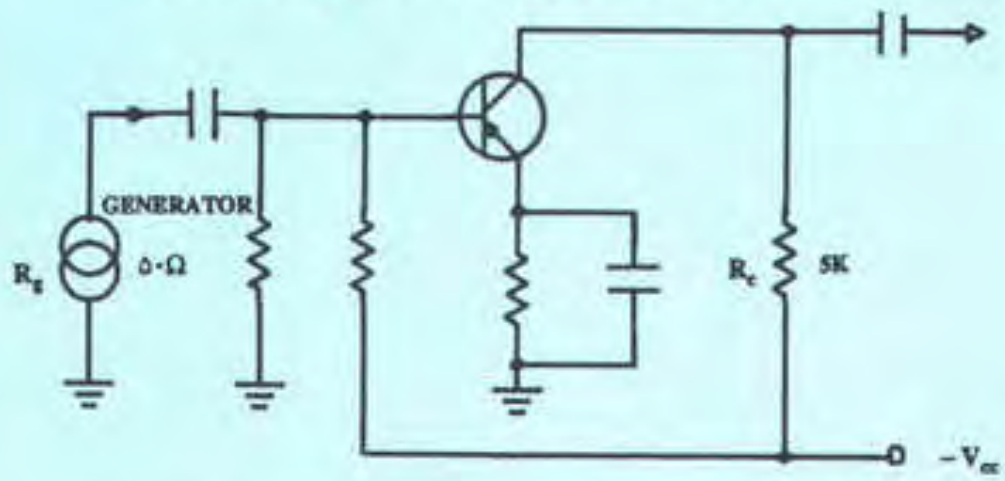
این فرمولها در طرح مدارهای ترانزیستوری اهمیّت بسیاری دارند ودر اغلب کتابهای ترانزیستوردیده می شوند. پارامترهای h هر ترانزیستور ، در برگ مشخّصات آن ذکر می گردد . در مثال زیر به اهمیّت نقش پارامترهای h پی می بریم .

مثال ۱ـ۶ : مشخّصات مختلف مدار شکل (۱۳ ـ۶) را ، با استفاده از مقادیر پارامترهای h جدول (۱ ـ۶) و فرمولهای مندرج در جدول (۲ ـ ۶) ، محاسبه نمایید.

	مقدار حقیقی	مقدار تقریبی
A_i	$\frac{h_{fe}}{1 + h_{oe} R_L}$	h_{fe}
A_V	$\frac{-h_{fe} R_L}{R_L \Delta he + h_{ie}}$	$\frac{h_{fe} R_L}{h_{fe}}$
A_p	$\frac{(h_{fe})^2 R_L}{(1 + h_{oe} R_L)(R_L \Delta he + h_{ie})}$	$\frac{(h_{fe})^2 R_L}{h_{ie}}$
R_i	$\frac{R_L \Delta he + h_{ie}}{1 + h_{oe} R_L}$	h_{ie}
R_o	$\frac{R_g + h_{ie}}{\Delta he + R_g\ h_{oe}}$	-

$$\Delta he = h_{ie} - h_{re}\, h_{fe}$$

جدول (۲ ـ ۶) فرمولهای لازم برای طرح یک مدار CE



شکل (۱۳ ـ ۶) یک طبقه تقویت کننده CE که پارامترهای h آن در جدول (۱ ـ ۶) داده شده اند .

حل : مقاومت داخلی منبع سیگنال (R_g) برابر ۵۰Ω و $R_L = R_C = 5k\Omega$ می باشد .

دقیق $A_i = \frac{h_{fe}}{1+h_{oe}R_L} = \frac{۴۴}{1+(۲۷\times۱۰^{-۶}\times۵۰۰۰)} = \boxed{۳۹}$

تقریبی $A_i = h_{fe} = \boxed{۴۴}$

تقریبی $A_v = \frac{h_{fe}R_L}{h_{ie}} = \frac{۴۴\times۵۰۰۰}{۱۴۰۰} = \boxed{۱۵۷}$

تقریبی $A_p = \frac{(h_{fe})^۲R_L}{h_{ie}} = \frac{(۴۴)^۲\times۵۰۰۰}{۱۴۰۰} = \boxed{۶۹۱۰}$

تقریبی $R_i = h_{ie} = \boxed{۱۴۰۰\Omega}$

$$R_o = \frac{R_g + h_{ie}}{\Delta he + R_g h_{oe}}$$

$$\Delta h_e = h_{ie}h_{oe} - h_{re}h_{fe} = ۱۴۰۰(۲۷\times۱۰^{-۶}) - (۳/۳۷\times۱۰^{-۴})۴۴ = \boxed{۰/۰۲۳}$$

$$R_o = \frac{۵۰+۱۴۰۰}{۰/۰۲۳+۵۰(۲۷\times۱۰^{-۶})} = \boxed{۶۰k\Omega}$$

۵ـ۶ـ تجزیه و تحلیل تقویت کننده ها با استفاده از مدار معادل h

در این قسمت ، یک تقویت کنندهٔ ترانزیستوری را ، با استفاده از مدار معادل h مورد بررسی قرار می دهیم . در اینجا آرایش ترانزیستور (CE، CB و CC) مورد نظر نیست . نتایج به دست آمده از این بررسی برای هریک از آرایشهای فوق ، قابل استفاده خواهد بود به شرط اینکه پارامترهای مربوط به نوع آرایش مورد نظر در مدار معادل قرار گیرد .

همان طوری که از شکل (۱۴ـ۶) پیداست، تمامی تقویت کننده ها عناصری هستندکه دو ورودی و دو خروجی دارند و معمولاً برای هر تقویت کننده شش کمیّت به شرح زیر درنظر گرفته می شود:

۱ ـ تقویت جریان (A_i)

۲ ـ تقویت ولتاژ (A_V)

۳ ـ امپدانس ورودی (Z_i)

۴ ـ امپدانس خروجی (Z_o)

۵ ـ تقویت توان (A_p)

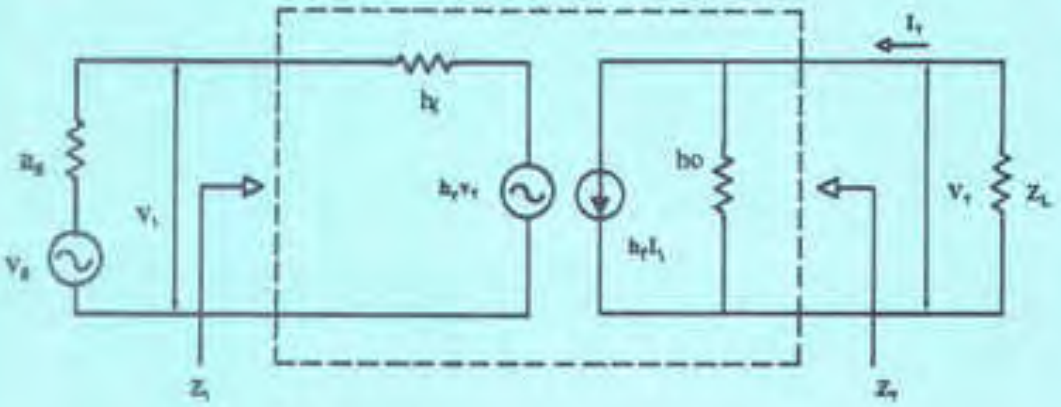
۶ ـ روابط فازی (φ)

در مدار شکل (۱۴ ـ۶) کمیّت Z_L می تواند هر ترکیبی از عناصر مقاومتی و راکتیو باشد . R_s مقاومت داخلی منبع یا هر مقاومت دیگری که با آن سری شده باشد است .

لازم به تذکر است که در تجزیه و تحلیل مدار فوق ، هیچ گونه بحثی پیرامون مقادیر DC ونوع بایاس کردن آن نخواهد شد.

شکل (۱۴ـ۶) مدار معادل یک تقویت کننده

۱ـ۵ـ۶ـ **تقویت جریان :** $A_i = \frac{I_2}{I_1}$ مدار معادل h را، به جای ترانزیستور در شکل (۱۴ـ۶) قرار می دهیم . بنابراین ، شکل (۱۵ ـ۶) به دست می آید.



شکل (۱۵ـ۶) مدار معادل AC با پارامترهای h

با نوشتن قانون جریان کیرشهوف در مدار خروجی (محل انشعاب جریان خروجی) خواهیم داشت :

$$I_2 = h_f I_1 + h_o V_2 \qquad (kcl)$$

باقراردادن $V_2 = -I_2 Z_L$ در رابطهٔ فوق

$$I_2 = h_f I_1 - h_o I_2 Z_L$$

$$I_2 + h_o I_2 Z_L = h_f I_1$$

از I_2 فاکتور می گیریم .

$$I_2(1 + h_o Z_L) = h_f I_1$$

طرفین را بر I_1 تقسیم می کنیم .

$$\frac{I_2}{I_1}(1 + h_o Z_L) = h_f$$

به جای $\frac{I_2}{I_1}$ ضریب تقویت جریان ، یعنی : A_i را قرار می دهیم . $A_i = \frac{I_2}{I_1}$

$$A_i\ (h_o Z_L + 1) = h_f$$

$$\boxed{A_i = \frac{h_f}{h_o Z_L + 1}}$$

۲ـ۵ـ۶ـ تقویت ولتاژ : $A_v = \frac{V_2}{V_1}$ با اعمال قانون ولتاژ کیرشهوف در مدار ورودی ، (حلقه ورودی) خواهیم داشت : $v_1 = h_i I_1 + h_r V_2$ (kvl)

در محاسبهٔ A_i داشتیم : $I_2(h_o Z_L + 1) = h_f I_1$

یا $I_1 = \frac{I_2(h_o Z_L + 1)}{h_f}$

همچنین می توان نوشت : $I_2 = \frac{-v_2}{z_2}$

با قرار دادن I_1 و I_2 در رابطهٔ حلقه ، خواهیم داشت:

$$v_1 = h_i \frac{-v_2(1 + h_o z_L)}{h_f z_L} + hr v_2$$

طرفین را بر V_2 تقسیم می کنیم.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{-h_i(1 + h_o z_L)}{h_f z_L} + hr = \frac{-h_i(1 + h_o z_L) + h_r h_f z_L}{h_f z_L}$$

از معکوس کردن رابطهٔ فوق ، ضریب تقویت ولتاژ به دست می آید:

$$A_v = \frac{v_2}{v_1} = \frac{-h_f z_L}{h_i + (h_i h_o - h_r h_f) z_L}$$

بافرض $\Delta h = h_i h_o - h_r h_f$ می توان نوشت :

$$\boxed{A_v = \frac{-h_f z_L}{h_i + \Delta h z_L}}$$

۳ـ۵ـ۶ـ امپدانس ورودی: $Z_1 = \frac{V_1}{I_1}$ در مدار ورودی داریم:

$$v_1 = h_i I_1 + h_r v_2$$

به جای V_2 مقدار آن ($-I_2 Z_L$) را قرار می دهیم : $(V_2 = -I_2 Z_1)$

$$v_1 = h_i I_1 - h_r I_2 Z_L$$

به جای I_2 مقدار آن را ، یعنی : ($A_i I_1$) قرار می دهیم : $(A_i = \frac{I_2}{I_1})$

طرفین را بر I_1 تقسیم می کنیم : $v_1 = h_i I_1 - h_r A_i I_1 Z_L$

$$\frac{v_1}{I_1} = z_1 = h_i - h_r A_i Z_L$$

با قرار دادن مقدار A_i در رابطهٔ فوق ، Z_1 به دست می آید.

$$\boxed{z_1 = h_i - \frac{h_f h_r Z_L}{1 + h_o Z_L}}$$

۴ـ۵ـ۶ـ امپدانس خروجی: $Z_2 = \frac{V_2}{I_2}$ امپدانس خروجی ازنسبت ولتاژ خروجی به جریان خروجی وقتی V_s برابر صفر است بدست می آید. یعنی:

$$Z_2 = \frac{v_2}{I_2}\Big|_{V_s = 0}$$

برای حلقهٔ ورودی با $V_s = 0$ ، می توان نوشت :

$$I_1 R_s + I_1 h_i + h_r v_2 = 0$$

$$I_1 (R_s + h_i) = -h_r v_2$$

$$I_1 = \frac{-h_r v_2}{R_s + h_i}$$

برای مدارخروجی در نقطهٔ انشعاب ، می توان نوشت :

$$I_2 = h_f I_1 + h_o v_2$$

I_1 را در رابطهٔ فوق قرار می دهیم .

$$I_2 = h_f \frac{-h_r v_2}{R_s + h_i} + h_o v_2$$

طرفین را بر V_2 تقسیم می کنیم .

$$\frac{I_2}{v_2} = \frac{-h_f h_r}{R_s + h_i} + h_o$$

$$z_2 = \frac{v_2}{I_2} = \frac{1}{h_o - \frac{h_f h_r}{R_s + h_i}} = \frac{R_s + h_i}{h_o R_s + h_o h_i - h_f h_r}$$

$$\boxed{z_2 = \frac{R_s + h_i}{h_o R_s + \Delta h}}$$

۵ـ۵ـ۶ـ تقویت توان : $A_p = \frac{P_2}{P_1}$ مقدار توانی که به بار (مصرف کننده) می رسد ، برابر است با :

$$P_2 = V_2 I_2 \cos\varphi$$

اگر بار اهمی فرض شود $\cos\varphi = 1$ خواهد بود . لذا مقدار توان جذب شده توسّط بار ، برابر است با :

$$P_2 = V_2 I_2$$

همچنین توان ورودی برابر است با :

$$P_1 = V_1 I_1$$

تقویت توان ، از نسبت توان خروجی به توان ورودی به دست می آید. یعنی:

$$A_p = \frac{p_2}{p_1} = \frac{v_2 I_2}{v_1 I_1} = \frac{v_2}{v_1} \times \frac{I_2}{I_1}$$

با توجّه به روابطی که از قبل داشتیم . یعنی: $A_i = \frac{I_2}{I_1}$ ، $A_v = \frac{v_2}{v_1}$

$$A_p = A_v . A_i$$

مقادیر A_v و A_i را بر حسب پارامترهای h ، در رابطهٔ فوق قرار می دهیم .

$$A_P = \frac{h_f}{h_o z_L + 1} \times \frac{h_f z_L}{h_i + \Delta h x z_L}$$

$$\boxed{A_P = \frac{(h_f)^2 z_L}{(h_o z_L + 1)(h_i + \Delta h x z_L)}}$$

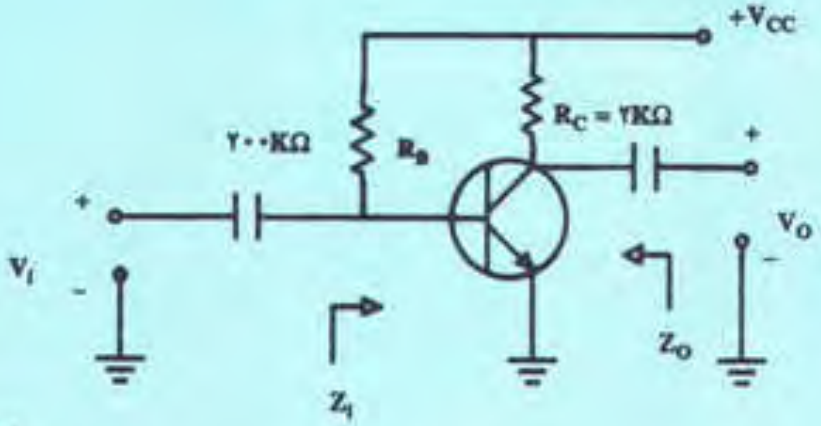
۶ـ۵ـ۶ـ**روابط فازی** : روابط فازی را به سادگی می توان با بررسی روابط A_i و A_v ـ که قبلاً توضیح داده شده اند ـ به دست آورد .

$$A_i = \frac{h_f}{1 + h_o z_L} \quad , \quad A_v = \frac{-h_f z_L}{h_i + \Delta h z_L}$$

با توجّه به روابط فوق ،برای ترکیب امیتر مشترک ، جریان ورودی و خروجی با هم هم فازند ولی ولتاژ خروجی (به خاطر علامت منفی در روابط فوق) با ورودی ، ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دارد.

برای آرایشهای بیس مشترک و کلکتور مشترک ، به علت منفی بودنِ h_f ، عکس مطلب فوق صادق است .

مثال ۲ـ۶ : در مدار شکل (۱۶ ـ۶) با توجّه به مقادیر داده شده برای پارامترهای h ، مقادیر A_i ، A_v ، Z_i ، Z_o ، A_p را به دست آورید.



شکل (۱۶ـ۶)

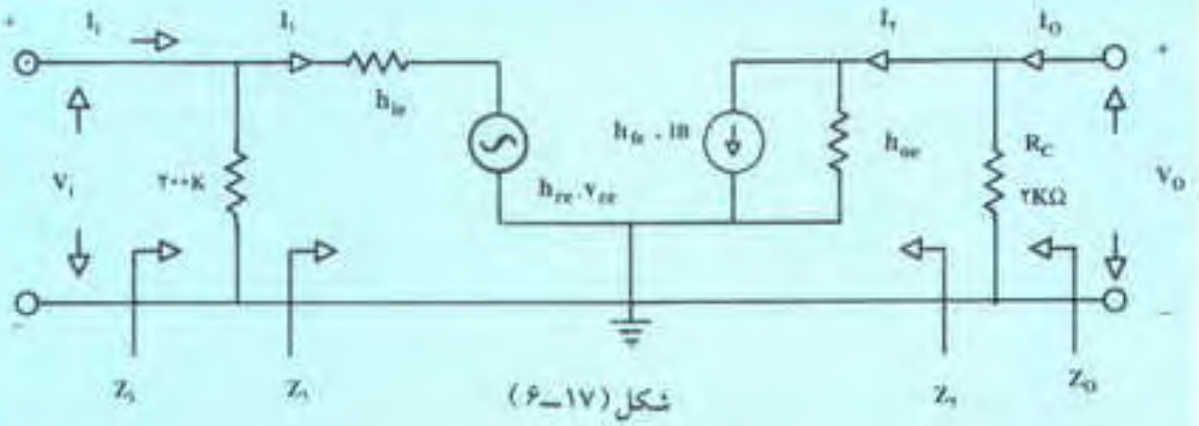
$h_{ie} = 1k$

$h_{re} = 2 \times 10^{-4}$

$h_{fe} = 50$

$h_{oe} = 20\mu A/V$

حل: مدار معادل شکل فوق را از نظر AC رسم می کنیم . شکل(۱۷ ـ۶)



شکل (۱۷ـ۶)

الف ـ محاسبهٔ A_i : با توجّه به مدار معـادل فوق ، جریانهای I_i و I_1 به علت وجود مقاومت ۲۰۰K که در مقابل Z_1 عدد بزرگی است ، تقریباً باهم برابرند. یعنی :

$$I_1 \simeq I_i$$

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{h_{fe}}{h_{oe}z_L + 1} = \frac{۵۰}{(۲۰\times۱۰^{-۶})(۲\times۱۰^{۳})+1}$$

$$\boxed{A_i = \frac{۵۰}{۱/۰۴} = ۴۸}$$

ب ـ محاسبه A_v :

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{-h_{fe}z_L}{h_{ie} + \Delta h_e z_L}$$

$$\Delta h_e = h_{ie}h_{oe} - h_{re}h_{fe} = (۱۰^{۳}\times۲۰\times۱۰^{-۶}) - (۲\times۱۰^{-۴})۵۰ = ۱۰^{-۲}$$

$$A_v = \frac{-۵۰(۲\times۱۰^{۳})}{۱۰^{۳} + (۱۰^{-۲})(۲\times۱۰^{۳})} = \frac{-۱۰^{۵}}{۱۰۲۰}$$

$$\boxed{A_v = -۹۸}$$

ج ـ محاسبه Z_i :

$$z_i = ۲۰۰k \| z_1$$

$$z_1 = h_{ie} - \frac{h_{fe}h_{re}z_L}{۱+h_{oe}z_L} = ۱۰^{۳} - \frac{۵۰(۲\times۱۰^{-۴})(۲\times۱۰^{۳})}{۱+(۲۰\times۱۰^{-۶})(۲\times۱۰^{۳})}$$

$$z_1 = ۹۸۰\Omega = ۰/۹۸k\Omega$$

$$z_i = ۰/۹۸k \| ۲۰۰k = \frac{۲۰۰\times۰/۹۸}{۲۰۰/۹۸}$$

$$\boxed{z_i = ۹۷۵\Omega = ۰/۹۷۵k\Omega}$$

د ـ محاسبه Z_o :

$$z_o = ۲k \| z_۲$$

$$z_۲ = \frac{۱}{h_{oe} - \frac{h_{fe}h_{re}}{h_{ie} + R_s}} = \frac{۱}{۲۰\times۱۰^{-۶} - \frac{۵۰\times۲\times۱۰^{-۴}}{۱۰^{۳} + ۰}} = ۱۰^{۵}\Omega$$

$$z_۲ = ۱۰۰k\Omega$$

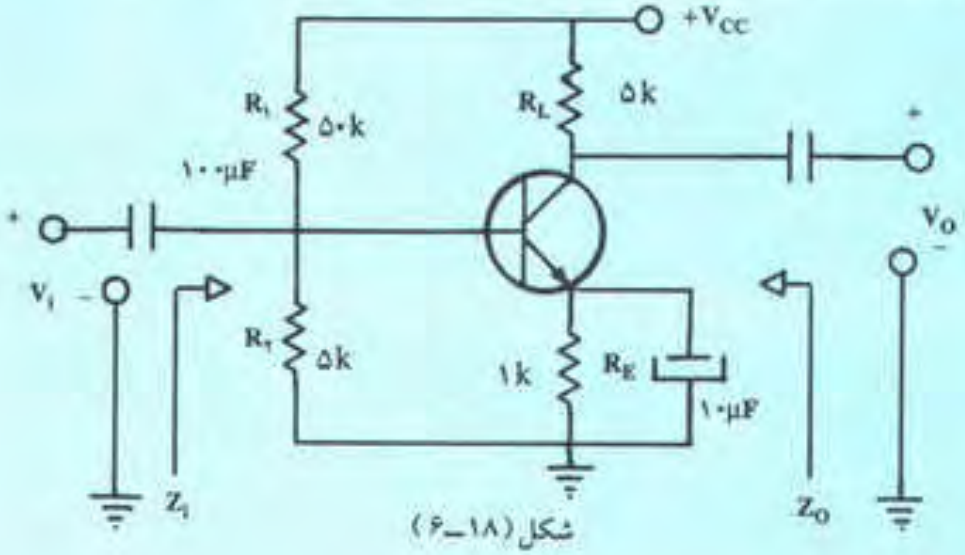
$$z_o = ۲k \| ۱۰۰k = \frac{۲\times۱۰۰}{۱۰۲} = ۱۹۶\Omega$$

$$\boxed{z_o = ۱۹۶\Omega = ۱/۹۶k}$$

هـ ـ محاسبه A_p :

$$A_p = A_v . A_i = -۹۸ \times ۴۸ = \boxed{۴۷۰۴}$$

مثال ۳ـ ۶ : در مدار شکل (۱۸ ـ ۶) با توجّه به مقادیر داده شده مطلوبست :



شکل (۱۸ـ۶)

الف ـ A_v

ب ـ A_i

ج ـ Z_i و Z_o

د ـ A_p

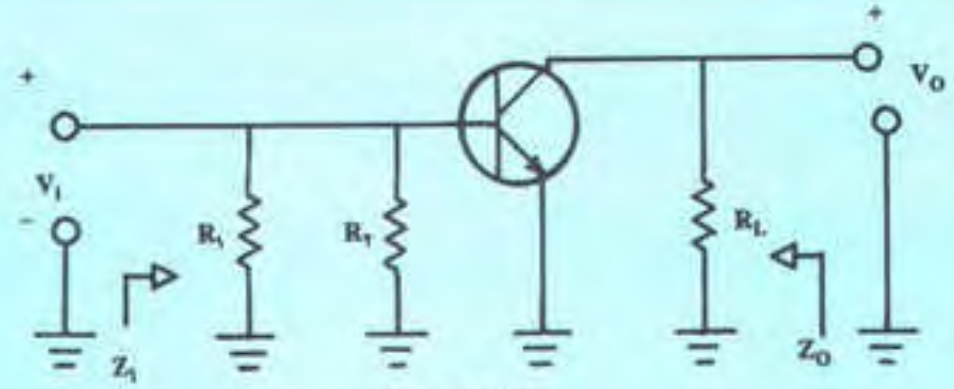
$h_{ie} = ۱/۵K$

$h_{re} = ۳\times۱۰^{-۴}$

$h_{fe} = ۸۰$

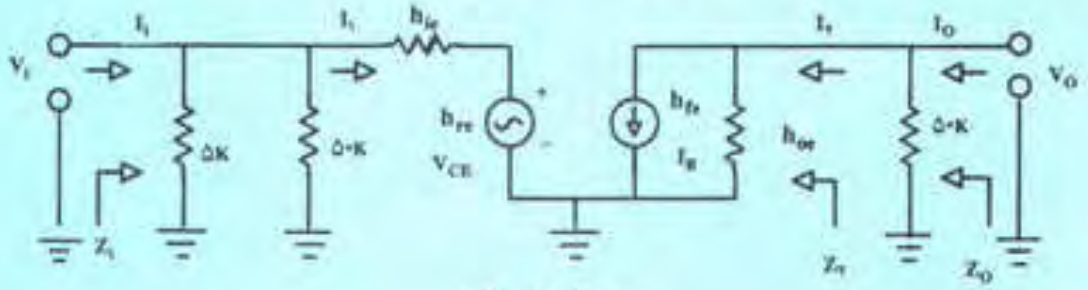
$h_{oe} = ۲۰\mu A/V$

حل : مدار معادل AC شکل فوق را رسم می کنیم . شکل(۱۹ ـ۶)



شکل (۱۹ـ۶)

با قرار دادن مدار h به جای ترانزیستور ، مدار شکل (۲۰ ـ۶) به دست می آید.



شکل (۲۰ـ۶)

الف ـ $A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{-h_{fe} z_L}{hie + \Delta h_e z_L} =$

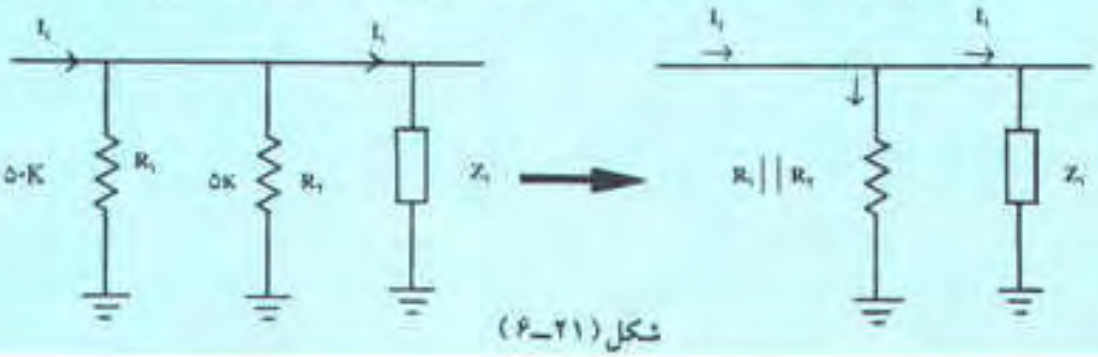
$\Delta h_e = h_{ie}h_{oe} - h_{fe}h_{re} = (۱/۵\times۱۰^{۳})(۲۰\times۱۰^{-۶}) - ۸۰(۳\times۱۰^{-۴}) = ۶\times۱۰^{-۳}$

$A_v = \frac{-۸۰\times۵\times۱۰^{۳}}{(۱/۵\times۱۰^{۳}) + ۶\times۱۰^{-۳}\times۵\times۱۰^{۳}} = \frac{-۴\times۱۰^{۵}}{۱۵۳۰}$

$\boxed{A_v = -۲۶۱/۴}$

ب ـ $A_i = \frac{I_o}{I_i}$

تقسیم جریان در ورودی مدار ، مطابق شکل (۲۱ ـ ۶) بدین صورت است:



شکل (۲۱ـ۶)

$$R_1 \| R_2 = \frac{250}{55} - 4/54 k\Omega$$

$$I_1 = \frac{I_i (R_1 \| R_2)}{R_1 \| R_2 + z_1} = \frac{I_i \times 4/54}{4/54 + z_1}$$

$$z_1 = hie - \frac{h_{re} h_{fe} z_L}{1 + h_{oe} z_L} = 1/5 \times 10^3 - \frac{3 \times 10^{-4} \times 80 \times 5 \times 10^3}{1 + 20 \times 10^{-6} \times 5 \times 10^3} = 1/281 k$$

$$I_1 = \frac{I_i \times 4/54}{4/54 + 1/281} = 0/78 I_i$$

یا

$$\frac{I_1}{I_i} = 0/78$$

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{I_2}{I_i} = \frac{I_1}{I_i} \times \frac{I_2}{I_1}$$

$$A_i = 0/78 \times \frac{h_{fe}}{1 + h_{oe} z_L} = \frac{0/78 \times 80}{1 + 20 \times 10^{-6} \times 5 \times 10^3}$$

$$\boxed{A_i = 56/72}$$

ج- $z_i = 5 k\Omega \| 50 k\Omega \| z_1 = 4/54 \| 1/28$

$$\boxed{z_i = 1 k\Omega}$$

$$z_o = 50 k\Omega \| z_2$$

$$z_2 = \frac{1}{h_{oe} - \frac{h_{fe} h_{re}}{h_{ie} + Rs}} = \frac{1}{20 \times 10^{-6} - \frac{80 \times 3 \times 10^{-4}}{1/5 \times 10^3 + 0}} = \frac{10^6}{4}$$

$$z_2 = 250 k\Omega$$

$$z_o = 50 k \| 250 k = \frac{50 \times 250}{300}$$

$$\boxed{z_o = 41/66 k\Omega}$$

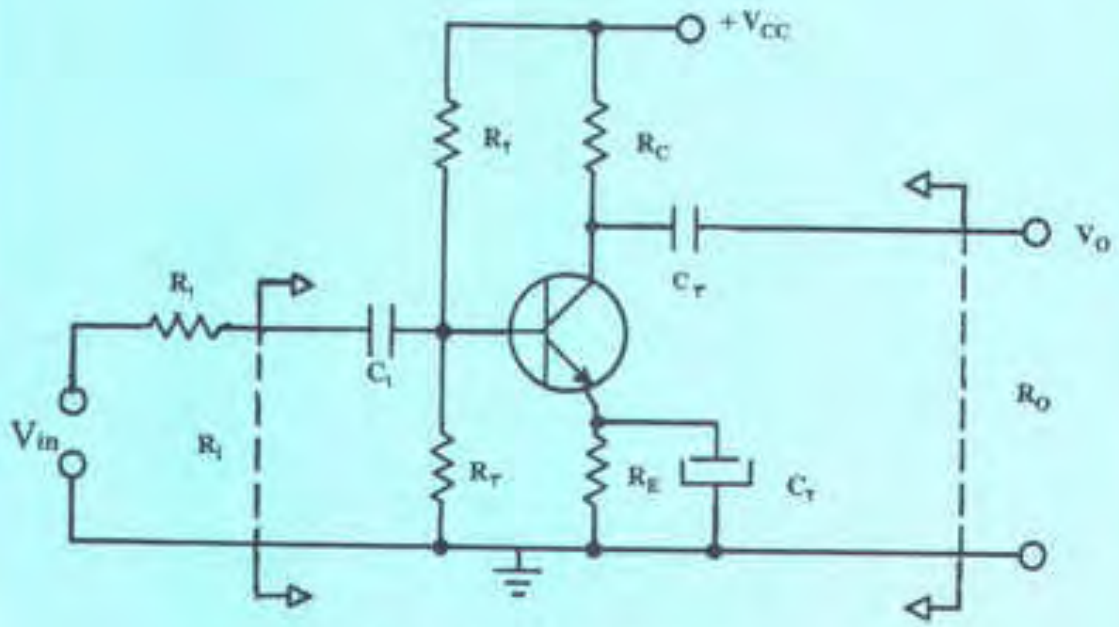
د- $A_p = A_v . A_i = -261/4 \times 56/72$

$$\boxed{A_p = 14826/6}$$

۶ـ۶ـ بررسی تقویت کنندهٔ امیتر مشترک (CE)

تقویت کنندهٔ امیتر مشترک ، بیشترین کاربرد را در انواع تقویت کننده ها دارد ؛ زیرا این تقویت کننده ، هم تقویت جریان و هم تقویت ولتاژ را انجام می دهد، لذا در بسیاری از موارد ، نسبت به تقویت کننده های دیگری برتری دارد.

مدار شکل (۲۲ـ۶) ، یک تقویت کننده امیتر مشترک بایاس سرخود را نشان می دهد.



شکل (۲۲ـ۶) یک تقویت کنندهٔ امیتر مشترک

محاسبهٔ مقاومتهای R_C ، R_E ، R_1 و R_2 : قبلاً در معرفی بایاسینگ گفته شد. نکته ای که دراینجا برای محاسبهٔ مقاومتهای فوق باید در نظر گرفت ، توجّه به نقطه کار DC و مفروضاتی است که خاصّ تقویت کننده های امیتر مشترک می باشد.

$$(I_2 = 5I_B \text{ و } R_E = \frac{R_C}{5} \text{ ، } V_{CE} = \frac{V_{CC}}{2})$$

برای اینکه ولتاژ متناوب روی مقاومت R_E افت نکند و نقطهٔ کار ترانزیستور تغییر نکند، دو سر مقاومت R_E را توسّط خازن C_2ـ که خازن بای پاس نامیده می شود ـ اتّصال کوتاه می کنند. خازنهای C_1 و C_3 خازنهای کوپلاژ می باشند و برای جدا کردن مؤلّفه های متناوب و مستقیم استفاده می شوند . مقاومت R_E برای تعیین نقطهٔ کار ترانزیستور ومقاومتهای R_2 و R_3 برای تغذیهٔ بیس و مقاومت R_C مقاومت کلکتور ترانزیستور به کار می روند. مقاومت R_1 کنترل کنندهٔ جریان ورودی است . مقاومتهای ورودی وخروجی ، روی شکل (۲۲ ـ ۶) کاملاً مشخص شده است.

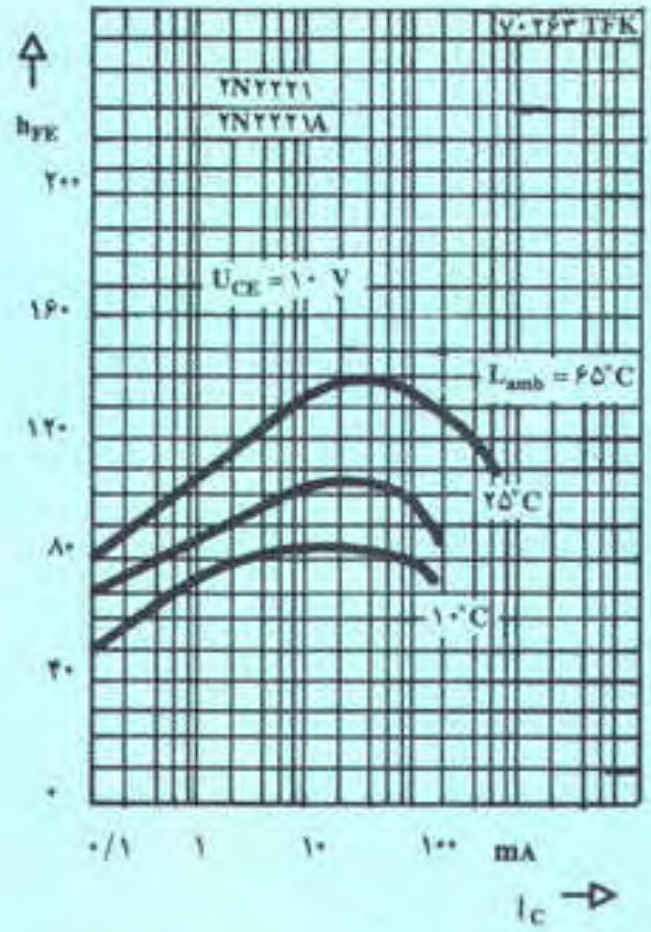
۱ـ۶ـ۶ـ **بهره جریان** : جریان ورودی، جریان بیس و جریان خروجی، جریان کلکتور می‌باشد . چون جریان کلکتور، چندین برابر جریان بیس است ، بنابراین مدار امیتر مشترک ، جریان را تقویت می کنند. نسبت دو جریان را بهره جریان گویند و با حرف A_i نشان می دهند.

$$A_i = \frac{I_C}{I_B} = \beta$$

مقدار β را برای تقویت جریان DC به کار می برند . در جریان متناوب ، برای به دست آوردن بهرهٔ جریان از پارامتردیگری به نام h_{fe} استفاده می شود که از رابطهٔ زیر به دست می آید.

$$A_i = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = h_{fe}$$

در بسیاری موارد h_{fe} تقریباً با β برابرمی شود. β تابعی از جریان ، درجه حرارت و مقدار ولتاژ V_{CE} می باشد. کارخانه های سازنده ، تغییرات h_{fe} را بر حسب I_C در اختیار مصرف کننده قرار می دهند. شکل(۲۳ـ۶) منحنی h_{fe} را بر حسب I_C ، برای مقادیر $V_{CE} = ۱۰V$ و سه درجهٔ حرارت متمایز برای ترانزیستور ۲N۲۲۲۱ نشان می دهد.



شکل (۲۳ـ۶) منحنی β برحسب I_C در سه درجه حرارت

۲ـ۶ـ۶ـ بهرهٔ ولتاژ : در صورت اعمال یک ولتاژ متناوب ، بین بیس و امیتر (ورودی) یک ولتاژ متناوب زیادی در خروجی ، یعنی : کلکتور به امیتر به وجود می آید. بنابراین ، مدار امیتر مشترک ، تقویت ولتاژ را هم انجام می دهد . منحنیهای جریان ورودی و جریان خروجی در تقویت کننده امیتر مشترک ، هم فاز می باشند؛ زیرا با افزایش جریان بیس (جریان ورودی) جریان کلکتور (جریان خروجی) هم افزایش می یابد . امّا منحنیهای ولتاژ ورودی و خروجی ، در تقویت کنندهٔ امیتر مشترک با یکدیگر ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دارند چرا که با افزایش ولتاژ ورودی ، (جریان خروجی افزایش در نتیجه V_{CE} کاهش می یابد) ولتاژ خروجی کاهش خواهد یافت . عکس این عمل نیز صادق است. یعنی ، باکاهش ولتاژ ورودی ولتاژ خروجی افزایش می یابد. بهرهٔ ولتاژازتقسیم ولتاژ خروجی به ولتاژ ورودی به دست می آید وآن را با A_v نمایش می دهند.

$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

۳ـ۶ـ۶ـ مقاومت ورودی: برای تعیین مقاومت ورودی، باید جریان و ولتاژ ورودی را داشته باشیم .با توجه به شکل (۲۲ـ۶) جریان ورودی I_i وولتاژ ورودی V_i می باشد. از تقسیم ولتاژ ورودی به جریان ورودی مقاومت ورودی به دست می آید.

$$R_i = \frac{v_i}{I_i}$$

مقاومت ورودی، از سه مقاومت موازی R_2 و R_3 و مقاومت ترانزیستور(R_T) تشکیل می شود. مقاومت ورودی به سوی مقاومت R_T (مقاومت دیود بیس امیتر) میل می کند که مقدار آن کوچک می باشد.

۴ـ۶ـ۶ـ مقاومت خروجی : مقاومت خروجی از دومقاومت R_C و مقاومت بین کلکتور و امیتر به دست می آید. به علت بایاس مخالف بودن دیود کلکتور ، بیس مقاومتی که ازکلکتور امیتر دیده می شود بسیار بزرگ است. مقاومت بسیار بزرگ کلکتور امیتر وقتی با R_C (بار) موازی می شود ، مقاومت معادل (مقاومت خروجی) به سمت مقاومت R_C (بار) میل می کند که مقدار متوسّطی است . مقاومت خروجی را با R_O نمایش می دهند . برای اندازه گیری R_O باید یک بار ولتاژ خروجی را بدون بار(R_L) و بار دیگر با بار(R_L) اندازه گرفت و سپس از طریق فرمول زیر مقاومت خروجی را محاسبه کرد.

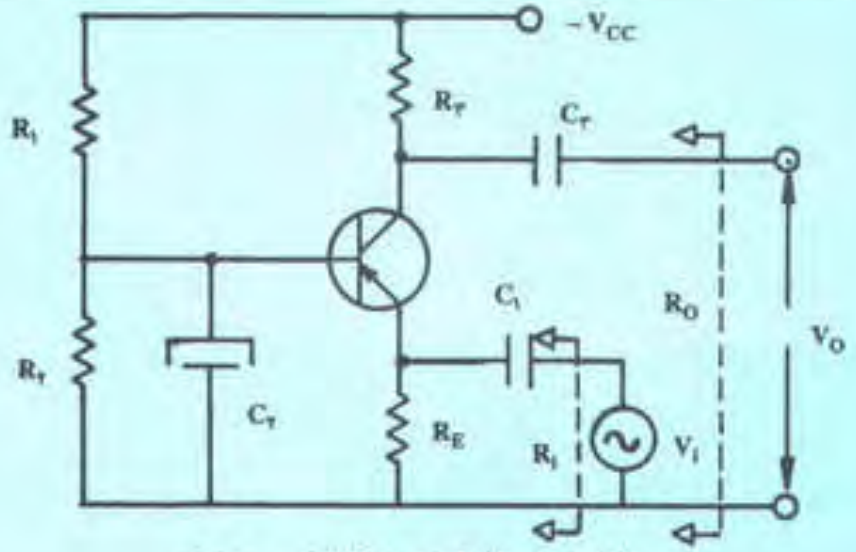
$$R_o = \frac{(v_{oo} - v_{oL})R_L}{v_{oL}}$$

در رابطهٔ فوق، V_{OO} ولتاژ خروجی بدون بار و V_{OL} ولتاژ خروجی با اتّصال بار می باشد.

۷ ـ ۶ ـ بررسی تقویت کنندهٔ بیس مشترک

در تقویت کنندهٔ بیس مشترک ، ورودی مدار ، بیس امیتر و خروجی آن کلکتور بیس میباشد. شکل (۲۴ ـ ۶) یک تقویت کنندهٔ بیس مشترک با تغذیه سر خود را نشان می دهد.

این مدار ، عیناً همان آرایش امیتر مشترک است ؛ با این تفاوت که بیس توسّط خازن C_2 از نظر A_C اتّصال کوتاه شده ، پایه مشترک را تشکیل می دهد و سیگنال ورودی به جای اینکه به بیس داده شود ، از طریق خازن کوپلاژ (C_1) به امیتر داده می شود و خروجی از طریق خازن کوپلاژ C_3 از کلکتور گرفته می شود. محاسبهٔ مقاومتهای بایاس ، با توجّه به نقطهٔ کار D_C و مفروضاتی که برای مدار امیتر مشترک در نظر گرفته شد ، می باشد.



شکل (۲۴ـ۶) یک تقویت کنندهٔ بیس مشترک

۱ ـ ۷ ـ ۶ ـ بهرهٔ جریان : جریان ورودی ، جریان امیتر (I_E) و جریان خروجی ، جریان کلکتور (I_C) می باشد. بین جریانهای امیتر ، کلکتور و بیس رابطه زیر برقرار است:

$$I_E = I_C + I_B$$

طبق رابطهٔ بالا ، جریان خروجی (I_C) همیشه از جریان ورودی (I_E)، کوچکتر است و بهره جریان نیز از تقسیم جریان خروجی به جریان ورودی، طبق رابطهٔ زیر ، به دست می آید. بنابراین در تقویت کننده بیس مشترک ، تقویت جریان وجود ندارد. به تعبیر دیگر ، ضریب تقویت جریان کوچکتر از واحد است .

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{I_C}{I_E}$$

۲ ـ ۷ ـ ۶ ـ تقویت ولتاژ : ضریب تقویت ولتاژ در تقویت کنندهٔ بیس مشترک زیاد است؛ زیرا تقریباً تمام جریان ورودی (I_E) وارد خروجی (I_C) می شود. جریان خروجی، پس از گذشتن از مقاومت R_C (بار) ، ولتاژ نسبتاً بزرگی نسبت به ولتاژ ورودی

ایجـاد می کند. بنابراین ضـریب بهـرهٔ ولتـاژ در این مدار بـالا است واز رابطهٔ زیر به دست می‌آید :

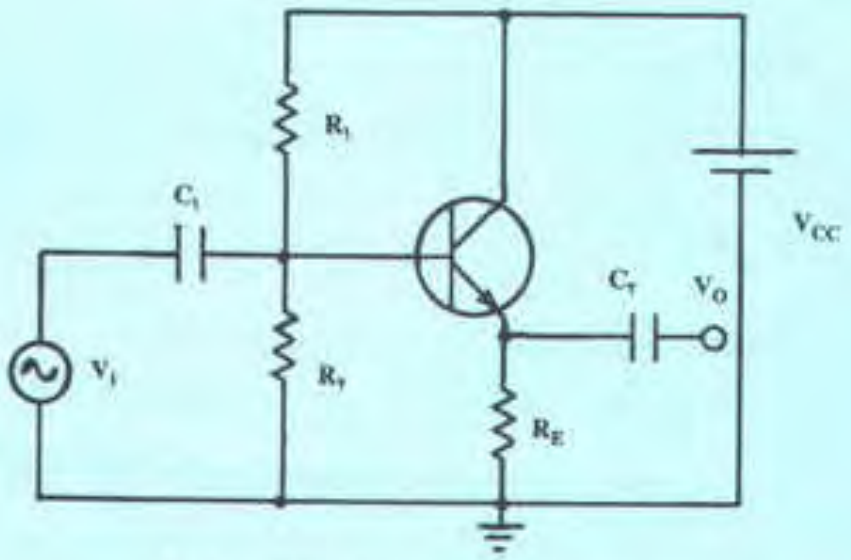
$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

۳ـ۷ـ۶ـ مقاومت ورودی : مقدار مقاومتی کـه از نظر امیتر بیس دیده می شود ، از مدار امیتر مشترک کـوچک تر می باشد. زیرا مقاومت دیود بیس امیتر با R_E ، موازی است که معـادل آنها بسیار کوچک است . مـحاسبهٔ مقاومت ورودی ، عـیناً شبیه محـاسبهٔ R_i در مدار امیتر مشترک است .

۴ـ۷ـ۶ـ مقاومت خروجی : مقدار مقاومـتی که از نظر کلکتور بیس دیده می شود بسیار بزرگ است. وچون مقاومت R_C با مقاومت کلکتور بیس موازی می شود معادل آن دو به سمت مقاومت R_C میل می کند . محاسبهٔ R_O ، عیناً شبیه محاسبهٔ مقاومت R_O در امیتـر مشـترک است. در تقـویت کنندهٔ بیس مـشتـرک ، ولتاژهای ورودی و خـروجی و جریانهای ورودی و خروجی هم فاز می باشند.

۸ـ۶ـ بررسی تقویت کنندهٔ کلکتور مشترک

اگر ورودی مدار تقویت کننده ای بین بیس و کلکتور و خروجی آن بین امیتر و کلکتور باشد، تقـویت کننده در حالت کلکتـور مشتـرک کار می کند. شکل (۲۵ ـ ۶) یک تقویت کنندهٔ CC با تغـذیه سر خـود را نشان می دهـد. دراین مدار ، منبع تغـذیه DC از نظر ولتاژ متناوب (AC) اتّصال کوتاه می باشد. مـقاومتهای بایاس با استفاده از مـفروضات خاص کلکتور مشترک ($I_e = I_B$) ونقطهٔ کار DC ، قابل محاسبه می باشد.



شکل (۲۵ـ۶) یک تقویت کنندهٔ کلکتور مشترک

۱ـ۸ـ۶ـ**بهرهٔ جریان** : در مدار کلکتور مشترک ، جریان ورودی ، جریان بیس و جریان خروجی ، جریان امیتر می باشد و چون جریان امیتر خیلی بیشتر از جریان بیس است ، این مدار ، دارای ضریب تقویت جریان زیادی است که معمولاً این ضریب در حدود β ترانزیستور می باشد . بنابراین بهرهٔ جریان ازنسبت جریان امیتر و بیس به دست می آید .

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{I_E}{I_B} = 1 + \beta$$

چنانچه از یک در مقابل β صرفنظر شود ، $A_i = \beta$ می باشد .

۲ـ۸ـ۶ـ**بهرهٔ ولتاژ** : ولتاژ خروجی در مدار کلکتور مشترک ، همان تغییرات ولتاژامیترکلکتورو ولتاژ ورودی تغییرات ولتاژ بیس کلکتور می باشد . از آنجایی که

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

است ، لذا تغییرات V_{CB} همواره کمتر از تغییرات V_{CE} است و A_V کمتر از واحد می باشد .

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{\Delta V_{CB}}{\Delta V_{CE}} < 1$$

۳ـ۸ـ۶ـ**مقاومت ورودی** : ازنظر ورودی ، مقاومتهای R_1 و R_2 و R_T با هم موازیند که معادل آنها خیلی کوچک خواهد بود . بنابراین ،

$$R_i = R_1 \| R_2 \| R_T$$

R_T ، مقاومت دیود بیس کلکتور است که نسبت به مقاومت معادل (R_1 و R_2) قابل توجّه و بزرگ می باشد . لذا مقاومت ورودی به سمت مقاومت معادل R_1 و R_2 میل می کند .

۴ـ۸ـ۶ـ**مقاومت خروجی** : از نظر خروجی ، مقاومت امیتر (R_E) با مقاومت کلکتور امیتر موازی است که مقاومت معادل آن دو ، یعنی : R_O از مقاومت امیتر هم کوچکتر خواهد شد .

$$R_o = R_E \| R_T$$

در مدار کلکتور مشترک ، چون ولتاژ خروجی تابعی از ولتاژ ورودی است ، بنابراین دراین آرایش بین ولتاژ خروجی و ولتاژ ورودی اختلاف فاز وجود ندارد . همچنین اختلاف فاز بین جریانهای ورودی و خروجی صفر می باشد .

خلاصه ای از مشخّصات سه نوع تقویت کننده در جدول (۳ـ۶) درج گردیده است .

	امیتر مشترک (CE)	بیس مشترک (CB)	کلکتور مشترک (CC)
بهرهٔ جریان	متوسط	کم و کوچکتر از واحد	زیاد
بهرهٔ ولتاژ	متوسط	زیاد	کم و کوچکتر از واحد
بهرهٔ توان	خیلی زیاد	زیاد و تقریباً برابر بهره ولتاژ	زیاد و تقریباً برابر بهره جریان
مقاومت ورودی	متوسط	کم	زیاد
مقاومت خروجی	متوسط	زیاد	کم
اختلاف فاز	۱۸۰°	۰°	۰°

جدول (۳ـ۶)

جدول (۴ ـ ۶) نیز مقادیر عددی را برای ترانزیستور ۲N۳۹۰۴ با مشخصات $I_C = 1mA$ ، $R_C = 2/5k\Omega$ و $R_E = 390\Omega$ در حالتهای CE، CB و CC نشان می دهد .

	CE	CC	CB
A_i	۱۲۰	۱۲۰	۱
A_v	۱۰۰	۱	۱۰۰
A_p	۱۲۰۰۰	۱۲۰	۱۰۰
R_i	۳kΩ	۵۰kΩ	۲۵Ω
R_o	۱۲۵kΩ	۲۵Ω	۱۵MΩ

جدول (۴ـ۶)

۹ ـ ۶ـ کاربرد

تقویت کنندهٔ امیتر مشترک چون ، دارای امپدانس (مقاومت) ورودی و خروجی متوسّطی است، یعنی ، هم جریان وهم ولتاژ را تقویت می کند در موارد تقویت انتهایی ، میانی و ابتدایی کاربرد دارد و دارای پهنای باند فرکانسی نسبتاً خوبی است . ضمناً بین ورودی و خروجی آن ۱۸۰ درجه فاز به وجود می آید .

تقویت کنندهٔ بیس مشترک ، یک تقویت کنندهٔ ولتاژ است و دارای پهنا باند فرکانسی وسیعتری نسبت به تقویت کننده' امیتر مشترک می باشد و در مواردی که امپدانس ورودی

کم لازم باشد استفاده می شود . دراین آرایش ، بین ورودی و خروجی آن اختلاف فازی نیست .

تقویت کننده کلکتور مشترک : دارای بهره ولتاژکم و بهره جریان زیاد می باشد و نیز امپدانس ورودی آن زیاد و امپدانس خروجی آن کم است از این تقویت کننده به عنوان یک تقویت کننده جریان در رگولاتورها و نیز به عنوان تقویت کننده انتهایی در طبقه تقویت صوتی استفاده می کنند . این تقویت کننده به علت دارابودن امپدانس ورودی زیاد و امپدانس ورودی کم به عنوان تطبیق دهنده امپدانس (تبدیل امپدانس زیاد به امپدانس کم) نیز مورد استفاده قرار می گیرد .

پرسش

۱ـ تقویت کننده ها را از چه نظرهایی طبقه بندی می کنند؟ نام ببرید.

۲ـ تقویت کننده از لحاظ فرکانس به چند دسته تقسیم می شوند؟ نام ببرید.

۳ـ کلاسهای A، B، AB و C را تعریف کنید.

۴ـ برای بررسی مدار معادل AC چه کارهایی باید انجام داد؟

۵ـ یکی از روشهایی که ارتباط پارامترهای I_1 ، V_1 و I_2 و V_2 را مشخّص می کند، نام ببرید.

۶ـ نامگذاری به کار رفته برای پارامترهای h را توضیح دهید.

۷ـ مدار معادل تقویت کننده های CE، CB و CC را رسم کنید.

۸ـ مقادیر A_i ، A_v ، Z_i ، Z_o ، A_p را با استفاده از پارامترهای h محاسبه نمایید.

۹ـ یک تقویت کننده CE بایاس سرخود رسم کنید و برای نقطهٔ کار Q و منبع ۱۲ ولتی مقاومتهای R_e ، R_C ، R_1 و R_2 را به دست آورید.

$$Q\begin{cases} I_C = 10mA \\ I_B = 60\mu A \\ V_{CE} = \frac{V_{cc}}{2} \\ V_{BE} = 0/7 \end{cases}$$

R_i از چه مقاومتهایی تشکیل شده ؟ نام ببرید.

S_i را به دست آورید.

۱۰ـ یک تقویت کننده CB بایاس سر خود، طراحی کنید و سپس مقاومتهای بایاس را برای نقطهٔ کار Q و $V_{cc} = 16V$ به دست آورید.

$$Q\begin{cases} V_{CE} = 8v \\ I_C = 5mA \\ I_B = 0/1mA \\ V_{BE} = 0/2v \end{cases}$$

R_i از چه مقاومتهایی تشکیل شده است؟

ضریب حرارتی (S_i) را به دست آورید.

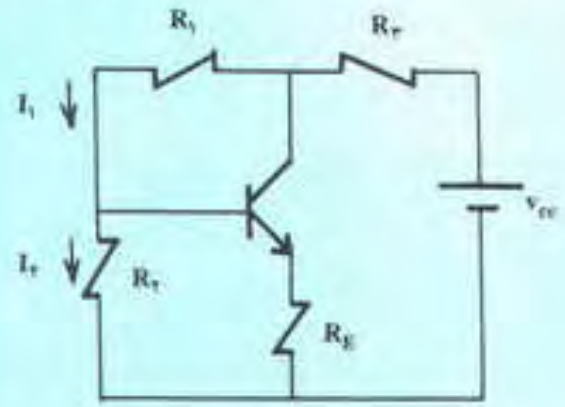
۱۱ـ یک تقویت کننده با یاس سرخود، CC طراحی کنید سپس مقاومتهای بایاس را برای نقطهٔ کار Q به دست آورید.

$$Q\begin{cases} V_{CC} = 15v \\ I_C = 10mA \\ I_B = 10\mu A \\ V_{CE} = 6v \\ V_{BE} = 0/7v \end{cases}$$

R_i از چه مقاومتهایی تشکیل شده است؟

۱۲ـ اگر ترانزیستوری دارای $\beta = ۵۰$ باشد، مقادیر α و γ را به دست آورید.

۱۳ـ در مدار شکل (۶ـ۲۶) اگر $V_{CC} = ۱۴V$ و $V_{CE} = ۶/۶V$ و $I_C = ۱۰mA$ و $B = ۲۰$ و $V_{BE} = ۰/۶V$ و $R_۲ = ۲۷K\Omega$ و $I_۱ = ۶I_۲$ باشد مطلوبست محاسبه مقادیر R_E، $R_۱$ و $R_۲$

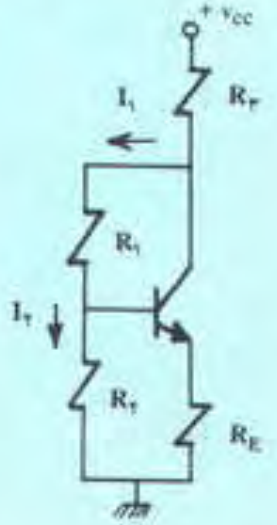


شکل (۶ـ۲۶)

۱۴ـ در مدار شکل (۶ـ۲۷) چنانچه $V_{CC} = ۱۵/۵V$ و $R_۳ = ۲K\Omega$ و $R_۲ = ۹K\Omega$ و $I_C = ۲mA$ و $\beta = ۲۰$ و $I_۱ = ۴I_B$ و $V_{BE} = ۰/۶V$ باشد مطلوبست:

الف ـ مقدار R_E و $R_۱$

ب ـ مقدار V_{CE} و توان تلف شده در ترانزیستور



شکل (۶ـ۲۷)

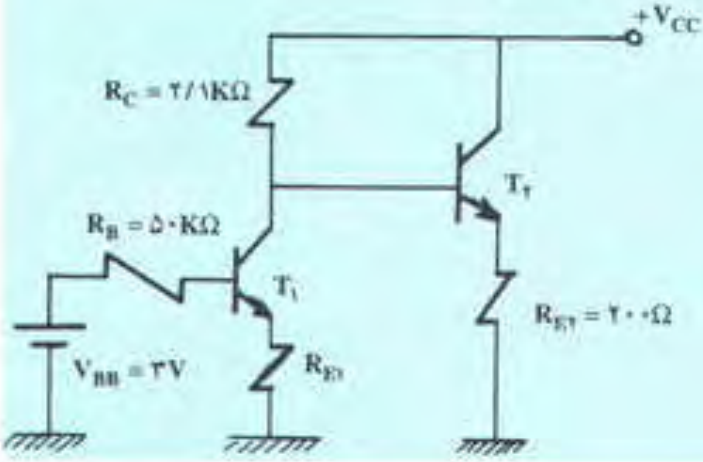
۱۵ـ در مدار شکل (۶ـ۲۸) چنانچه $\beta_۱ = ۵۰$ و $\beta_۲ = ۲۹$ و $V_{CE۲} = ۷V$ و $V_{BE۱} = V_{BE۲} = ۰/۷V$ باشد مطلوبست محاسبه:

الف ـ $I_{C۲}$

ب ـ $I_{C۱}$

ج ـ $V_{CE۱}$

د ـ توان تلف شده در $T_۱$

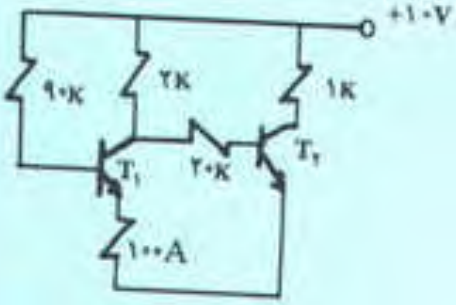


شکل (۶ـ۲۸)

۱۶ ـ در شکل (۲۹ ـ ۶) داریم :

$V_{BE۲} = V_{BE۱} = ۰/۷V$ و $\beta_۲ = ۴۰$ و $\beta_۱ = ۳۰$

مطلوبست محاسبه : $I_{C۱}$ و $I_{C۲}$ و $V_{CE۱}$ و $V_{CE۲}$



شکل (۲۹ـ۶)

منابع و مآخذ مورد استفاده

۱ـ الکترونیک۱ تألیف دکتر محمد ربیعی

۲ـ الکترونیک کاربردی تألیف مهندس علوی

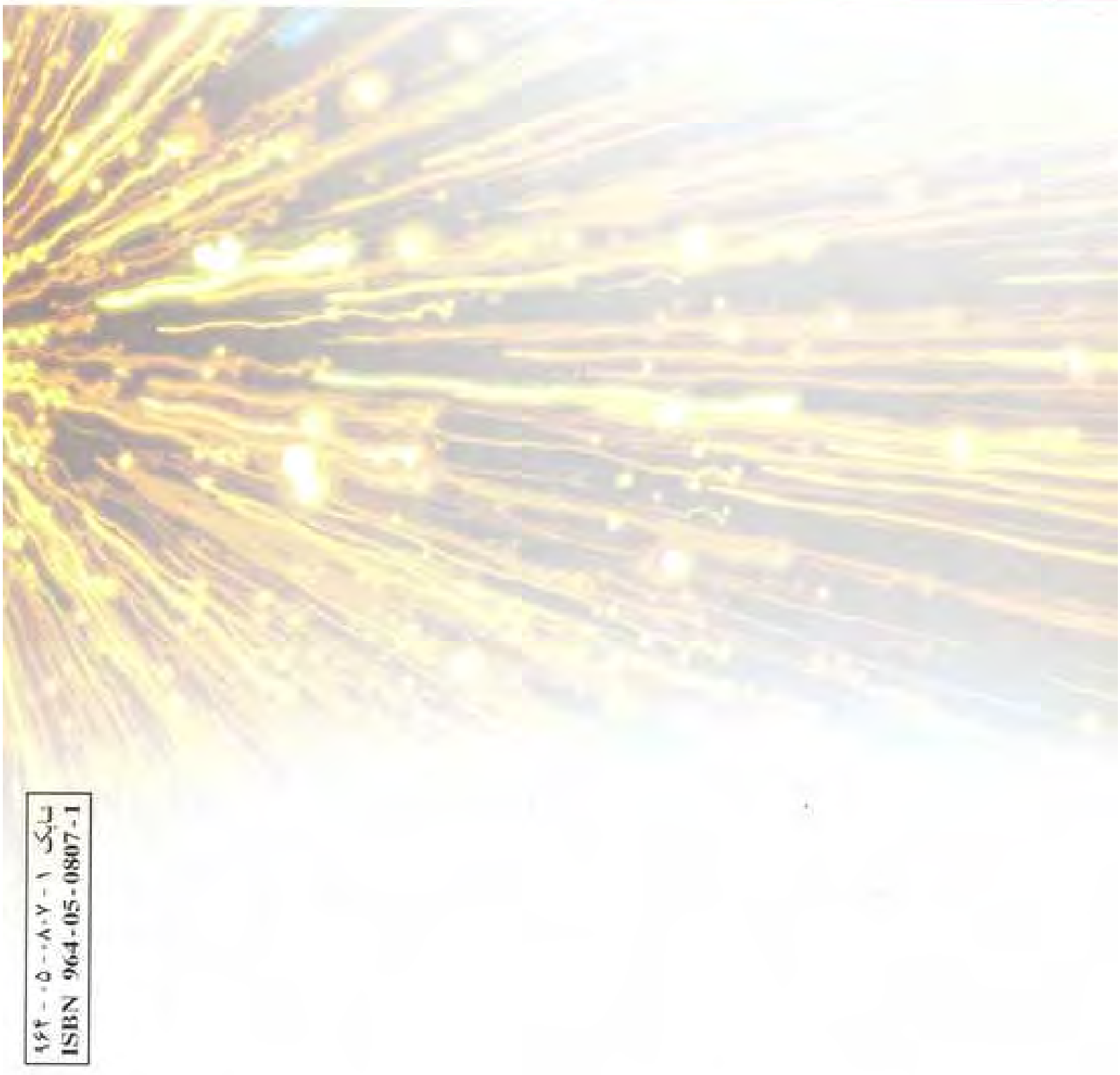
۳ـ اصول دیود و ترانزیستور ترجمه پرویز شهبازی

۴ـ الکترونیک عمومی تألیف مهندس خلج ـ مهندس نظریان

5- Electronic devices and circuit Theory by Robert Boylestad Louis Nashelsky.

6- Transistor Fundamentals by Rober J. Brite.

7- Transistor circuit action by Henry C. Vealch.



شابک ۱-۰۸۰۷-۰۵-۰۰-۱۶۴
ISBN 964-05-0807-1

قیمت در تمام کشور ۳۳۰۰ ریال

۱۳۸۴