



گروه مهندسی ساخت و اجرا

مرجع تخصصی نقشه، مدل، مقاله و کتاب
و انواع پروژه‌های مهندسی

www.Sakhtoejra.com

 @sakhtoejra

بنام خدا

الکترونیک (۱)

Electronics

ای کاش پرده می فهمید تا وقتی که پنجره باز است فرصت رقصیدن دارد

.....

❖ فهرست مطالب:

فصل اول: فیزیک الکترونیک

فصل دوم: معرفی دیود

فصل سوم: بررسی و تجزیه و تحلیل مدارهای دیودی

فصل چهارم: ترانزیستور پیوندی دو قطبی (ترانزیستورهای Bjt)

فصل پنجم: طراحی مدارهای پایه ترانزیستور (تحلیل Dc و تحلیل سیکنال

کوچک Bjt)

❖ مراجع درسی (فارسی):

۱) مبانی الکترونیک جلد اول، تالیف دکتر سید علی میرعشقی

کتاب حل تمرین: تحلیل و طراحی مدارهای الکترونیک جلد اول تألیف مهندس تقی شفیع

❖ مراجع درسی (لایسن):

- 1) *Micro Electronic by Mill Man*
- 2) *Micro Electronic circuits by sedra*
- 3) *Integrated Electronics by Mill MAN*
- 4) *Electronic devices & circuit theory by Nashlesky*

❖ فصل اول: فیزیک الکترونیک

مقدمه :

در این فصل نگاهی گذرا به ساختمان بلوری نیمه هادیها و عمدتا آشنایی با چگونگی جابجایی بارهای الکتریکی در این اجسام و تفاوت آنها با فلزات خواهیم پرداخت . همین آشنایی مختصر می تواند به درک بیشتر و بهتر مفاهیم که در فصل های بعد مورد مطالعه قرار می گیرند ، کمک نماید . بررسی دقیق تر بسیاری از مطالبی که در این فصل به گونه ای توصیفی به شرح آنها خواهیم پرداخت در کتاب های فیزیک الکترونیک به طور مفصل آمده است .

✓ تقسیم بندی اجسام از نظر هدایت الکتریکی

به طور کلی از نظر هدایت الکتریکی ، اجسام را می توان به سه دسته تقسیم نمود :

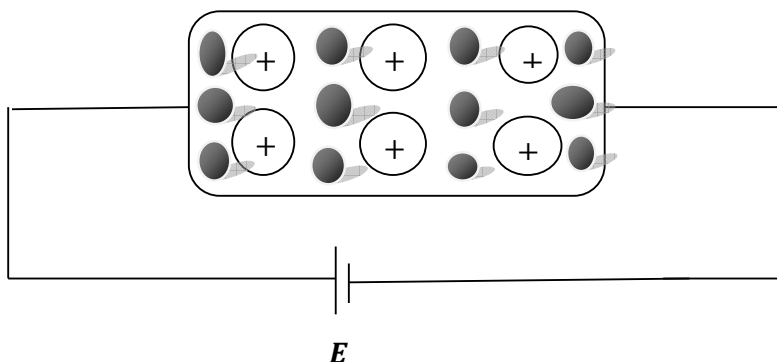
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{نقره - آلومینیوم - مس : مثال} \Rightarrow \rho < 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm} \Rightarrow \text{فلز یا هادی} \\ \text{ژرمانیوم - سیلیسیوم : مثال} \Rightarrow 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm} < \rho < 10^{+5} \Omega \cdot \text{cm} \Rightarrow \text{نیمه فلز یا نیمه هادی} \\ \text{الماس : مثال} \Rightarrow \rho > 10^{+5} \Omega \cdot \text{cm} \Rightarrow \text{عایق ها} \end{array} \right.$$

هم اکنون برای شروع به فلزات (هادی ها) خواهیم پرداخت :

➤ فلزات (هادی ها)

تعریف : هادی ها عناصر و ترکیباتی هستند که جریان الکتریکی را به خوبی از خود عبور می دهند .

نکته : عامل هدایت الکتریکی در فلزات ، الکترونها می باشند . به عبارت دیگر در فلز حامل های جریان الکترونها می باشند . به شکل زیر توجه کنید :



تذکر : در شکل فوق (+) نشان دهنده یون مثبت ساکن و هم چنین (●) نشان دهنده الکترونها می باشد . با توجه به شکل فوق مشاهده می گردد که هر چقدر میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ خارجی، قوی تر باشد سرعت الکترونها زیاد و هم چنین اگر میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ خارجی ضعیف باشد ، سرعت الکترونها هم کم خواهد بود، این موضوع بیانگر فرمول زیر می باشد :

$$V = \mu_n E$$

در فرمول فوق V سرعت الکترونها و μ_n (Mobility) قابلیت حرکت الکترونها و E هم میدان ناشی از ولتاژ خارجی می باشد .

➤ تعریف چگالی جریان و رسانایی ویژه فلزات :

$$\left. \begin{array}{l} V = \mu_n E \\ j = V \cdot n \cdot q \\ \sigma = n \cdot q \mu_n \end{array} \right\} \Rightarrow J = n \cdot q \mu_n E = \sigma \cdot E$$

در فرمول های فوق J بیانگر چگالی جریان و q بیانگر بار الکتریکی که دارای مقدار ثابت 1.6×10^{-19} می باشد و هم چنین σ نشان دهنده رسانایی ویژه فلز (Conductivity) می باشد که دارای واحد مهو خواهد بود .

➤ نیمه فلزات (نیمه هادی ها)

تعریف : در نیمه هادیا ، هدایت الکتریکی از هادیا کمتر می باشد ولی قابل کنترل است .

نکته : عامل اصلی هدایت الکتریکی در نیمه هادی ها ، الکترونها و حفرها می باشند .

تذکر مهم : عوامل موثر بر چگالی جریان در نیمه هادی ها :

(۱) مقدار دما : رابطه مستقیم با چگالی جریان

(۲) نور یا شدت تابش نور : رابطه مستقیم با چگالی جریان

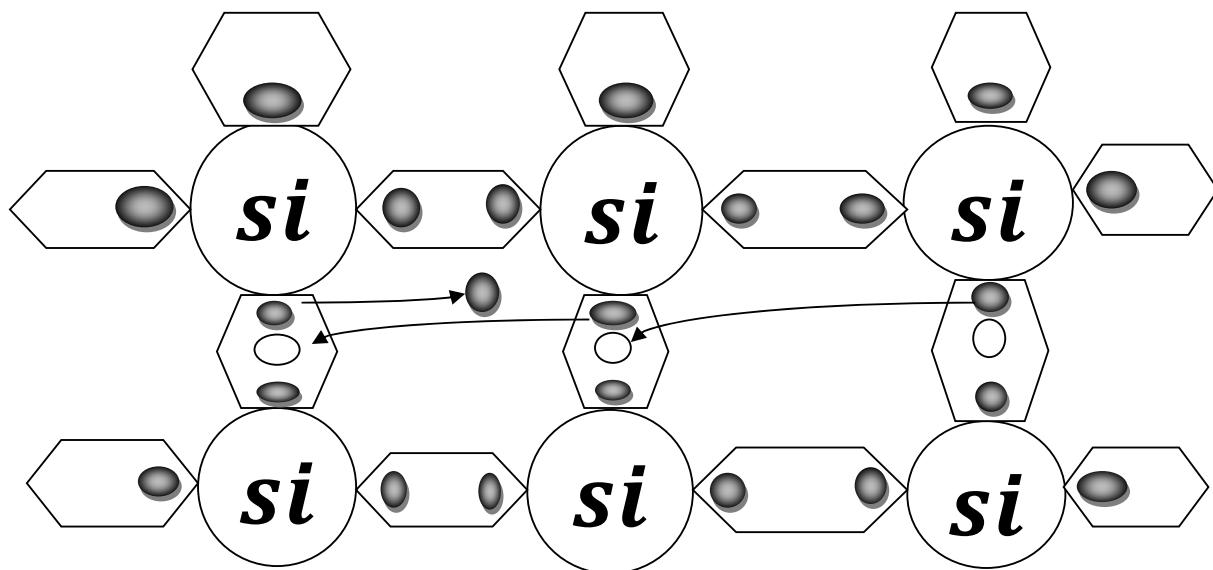
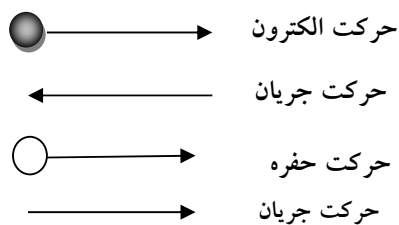
(۳) ناخالصی : رابطه مستقیم با چگالی جریان

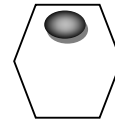
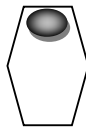
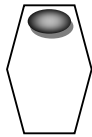
توجه داشته باشید که اصلی ترین نیمه هادی ها ، عبارتند از سیلیسیوم (سیلیکن - سیلیکون Si) و ژرمانیوم (Ge) ، که در گروه چهارم جدول تناوبی قرار دارند و در لایه والانس (لایه ظرفیت) خود دارای ۴ الکترون می باشند .

تذکر : در شکل های زیر همواره الکترون ها را با علامت منفی ، با حرف n و با دایره توپر و هم چنین حفره ها را با علامت مثبت ، با حرف p و با دایره تو خالی نمایش می دهیم .

تذکر : الکترونی که جایش را ترک می کند تولید حفره می نماید ، که باعث حرکت حفره ها به سمت چپ و الکترون ها به سمت راست می شود. این موضوع نشان دهنده حرکت مخالف حفره ها و الکترون ها می باشد . (حفره و الکترون در خلاف جهت هم حرکت می کنند) .

تذکر : حرکت جریان و الکترون خلاف جهت هم و هم چنین حرکت جریان و حرکت حفره موافق جهت هم می باشند . پس :

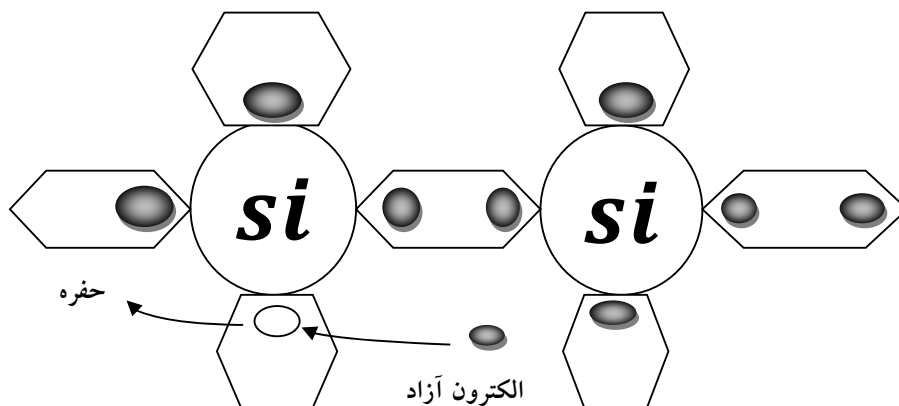




نکته : توجه داشته باشید که الکترونها حرکت آزادانه ندارند بلکه در پیوند کوالان (پیوند کوالانسی) بین اتم ها محصور می باشند و حفره ها جای خالی الکترونهای باند ظرفیت هستند که به باند هدایت منتقل شده اند هرگاه به هر دلیلی مثل دما ، تابش نور و ... یک الکترون جای خود را ترک نماید و در جای خود یک حفره ایجاد نماید یک الکترون ظرفیت از پیوند مجاور پیوند خود را شکسته و جای حفره قبلی را پر می نماید و یک حفره در اتم خود ایجاد می نماید و این ظاهرا به این معنی می باشد که حفره ها در حال حرکت هستند در حالی که این الکترونها هستند که جای خود را ترک کرده و یک حفره در اتم خود ایجاد می کنند .

➤ ترکیب مجدد :

پیش از این جای خالی حفره در باند ظرفیت توسط الکترون آزاد را ترکیب مجدد گویند اگر ترکیب مجدد همراه با تولید فوتون های نورانی باشد ما می توانیم یک نیمه هادی نورانی داشته باشیم مانند *LED*



➤ نیمه هادی خالص :

روابط ریاضی حاکم بر نیمه هادی خالص :

$$n = p = n_i \Rightarrow \sigma = \sigma_n + \sigma_p = p\mu_p q + n\mu_n q = n_i q (\mu_p + \mu_n)$$

در روابط فوق n نشان دهنده چگالی الکترونها و p بیانگر چگالی حفره ها و هم چنین σ نمایانگر رسانایی در نیمه هادی خالص و n_i نیز نشان دهنده چگالی ذاتی می باشد . ($n_i = \text{Intrinsic density}$)

در نیمه هادی خالص داریم :

$$n_i^2 = B \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{E_g}{KT}}$$

B وابسته به جنس \Rightarrow ضریب ثابت

T دمای مطلق بر حسب کلوین

$$K = \text{ثابت بولتزمن} = 1.38 * 10^{-23} \text{ j/k}^\circ = 8.62 * 10^{-5} \text{ ev/k}^\circ$$

$$E_g = \text{عرض نوار} \Rightarrow \begin{cases} \text{si} \Rightarrow 1.1 \text{ ev} \\ \text{Ge} \Rightarrow 0.72 \text{ ev} \end{cases}$$

$$n_i = \text{چگالی ذاتی} \Rightarrow \begin{cases} \text{si} \Rightarrow 1.5 * 10^{10} \text{ cm}^{-3} \\ \text{Ge} \Rightarrow 2.5 * 10^{13} \text{ cm}^{-3} \end{cases}$$

➤ نیمه هادی ناخالص :

اساس نیمه هادی ها عناصر سیلیسیم و ژرمانیوم می باشند که در گروه چهارم جدول تناوبی قرار داشته و در لایه ظرفیت خود دارای چهار الکترون آزاد می باشند . انواع ناخالصی ها به دو صورت زیر است :

<p>(1) ناخالصی نوع p : حفره ها زیاد باشد و الکترونها کم باشند (از گروه سوم برمی داریم) . عامل اصلی جریان حفره ها می باشند . $(In) - (Ga) - (B)$</p>	}	انواع ناخالصی ها
<p>(2) ناخالصی نوع n : حفره ها کم باشد و الکترونها زیاد باشند (از گروه پنجم برمی داریم) . عامل اصلی جریان الکترون ها می باشند . $(P) - (Ar) - (Sb)$</p>		

➤ بیان دو قانون مهم :

(۱) قانون تعادل الکتریکی :

$$N_D + p = N_A + n$$

N_D
 \downarrow
 ناخالصی دهنده

p
 \swarrow
 حفره

N_A
 \swarrow
 ناخالصی پذیرنده

n
 \rightarrow
 الکترون

(۲) قانون اثر جرم :

$$n \cdot p = n_i^2$$

استفاده و اثبات قوانین برای ناخالصی ها :

الف (ناخالصی نوع p

در این نوع ناخالصی اکثریت را حفره ها و اقلیت را الکترونها تشکیل می دهند پس می توان به کمک تقریب های نوع ناخالصی و دو قانون بیان شده ، روابط زیر را داشت :

$$P \Rightarrow N_D \cong 0 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} p \approx N_A : \text{قانون تعادل الکتریکی} \\ n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{n_i^2}{N_A} \Rightarrow \text{قانون اثر جرم} \end{array} \right.$$

الف (ناخالصی نوع N

در این نوع ناخالصی اکثریت را الکترونها و اقلیت را حفره ها تشکیل می دهند پس می توان به کمک تقریب های نوع ناخالصی و دو قانون بیان شده ، روابط زیر را داشت :

$$N \Rightarrow N_A \cong 0 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} n \approx N_d : \text{قانون تعادل الکتریکی} \\ p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_d} \Rightarrow \text{قانون اثر جرم} \end{array} \right.$$

مثال (در دمای ۳۰۰ درجه کلونین برای یک سیلیکون ناخالصی زیر اضافه شده است . مطلوبست محاسبه رسانایی نیمه هادی ناخالص به رسانایی نیمه هادی خالص .

$$N_d = 0.5 * 10^{15} cm^{-1} \Rightarrow \frac{\sigma_{\text{ناخالص}}}{\sigma_{\text{خالص}}} ?$$

عنصر (ماده مورد نظر) ویژگی	si (سیلیکون)	Ge (ژرمانیوم)	دما
μ_n	1300	3800	$300 K^\circ$
μ_p	500	1800	$300 K^\circ$

n_i	$1.5 * 10^{10}$	$2.5 * 10^{13}$	$300 \text{ } ^\circ \text{K}$

حل : در حل این مثال برخی از فرمولات در حالت کلی نیز بیان می گردد که برای مثالهای دیگر یا مشابه مورد استفاده قرار می گیرد .

همانطوریکه می دانید برای فلزات روابط رسانایی را به صورت زیر داریم :

$$j = \sigma E \quad \& \quad \sigma = n q \mu_n$$

از این روابط استفاده کرده و روابط مربوط به رسانایی برای ناخالصی و هم چنین انواع متفاوت ناخالصی ها را به دست می آوریم .

➤ روابط در نیمه هادی ها :

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = n q \mu_n + p q \mu_p$$

روابط در عناصر نیمه هادی خالص :

$$n = p = n_i \Rightarrow \sigma = \sigma_n + \sigma_p = n q \mu_n + p q \mu_p \Rightarrow \sigma = n_i q (\mu_n + \mu_p)$$

روابط در عناصر نیمه هادی نا خالص :

الف (ناخالصی نوع n :

$$\begin{cases} n = N_d \\ p = \frac{n_i^2}{N_d} \end{cases} \Rightarrow \sigma = N_d q \mu_n + \frac{n_i^2}{N_d} q \mu_p$$

الف (ناخالصی نوع p :

$$\begin{cases} p = N_A \\ n = \frac{n_i^2}{N_A} \end{cases} \Rightarrow \sigma = \frac{n_i^2}{N_A} q \mu_n + N_A q \mu_p$$

بنابراین در این مثال کافی است مقادیر را به کمک جدول داده شده در رابطه زیر جایگذاری کنیم . پس :

$$\frac{\sigma_{\text{ناخالص}}}{\sigma_{\text{خالص}}} = \frac{N_d q \mu_n + \frac{n_i^2}{N_d} q \mu_p}{\sigma = n_i q (\mu_n + \mu_p)} = 24074$$

یعنی رسانایی ویژه بلور سیلیکون حدودا ۲۴۰۰۰ برابر شده است .

➤ مولفه های جریان الکتریکی در نیمه هادی ها

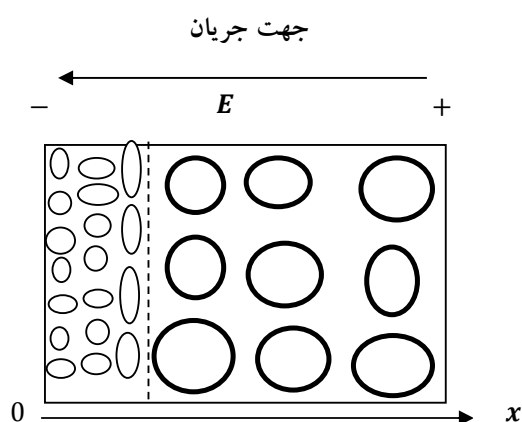
$$j_c = \text{Conductive Current}$$

(۱) جریان هدایتی

$$j_d = \text{diffusion Current}$$

(۲) جریان انتشاری

تذکر : اصلی ترین جریان همان جریان هدایتی می باشد که در اثر قرار گرفتن نیمه هادی در میدان الکتریکی این جریان ایجاد می گردد که روابط آن در قسمت زیر بررسی می شود .



باید توجه داشته باشیم که توزیع غیر یکنواخت ناخالصی در طول یک نیمه هادی منجر به تولید جریان انتشاری می گردد به عبارت دیگر داریم :

$$j_d \propto \text{گرادیان غلظت ناخالصی}$$

روابط زیر با توجه به شکل و موضوع فوق قابل برداشت می باشد :

$$j_d = -d_p q \frac{dp(x)}{dx}$$

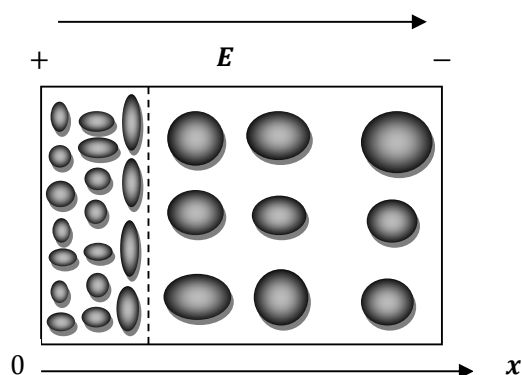
j_d : جریان نفوذی = جریان انتشاری

$$j_p : \Rightarrow \begin{cases} \text{si} : 13 \\ \text{Ge} : 47 \end{cases}$$

هم اکنون به جریان انتشاری ناشی از الکترونها خواهیم پرداخت . در این حالت نیز می توان گفت که توزیع غیر یکنواخت ناخالصی در طول یک نیمه هادی منجر به تولید جریان انتشاری می گردد به عبارت دیگر داریم :

$$j_d \propto \text{گرادیان غلظت ناخالصی}$$

به شکل زیر توجه کنید . در این شکل دایره های توپر بیانگر الکترونها می باشند به نحوه توزیع آنها در طول نیمه هادی توجه کنید که باعث تولید جریان انتشاری ناشی از الکترونها می شود .



روابط زیر با توجه به شکل و موضوع فوق قابل برداشت می باشد :

$$j_n = D_n q \frac{dn(x)}{dx}$$

$$j_p = -D_p q \frac{dp(x)}{dx}$$

جریان نفوذی = جریان انتشاری : j_d

$$D_n : \text{ثابت انتشار الکترون} \Rightarrow \begin{cases} \text{Si} : 34 \\ \text{Ge} : 99 \end{cases}$$

به کمک حالت تعادل در این شکل ها می توان میدان های ناشی از هر یک از حفره ها و الکترون ها را یافت . پس :

$$j_c + j_d = 0 \Rightarrow \text{در حالت تعادل}$$

الف) محاسبه میدان ناشی از حفره ها :

با توجه به نوع خالصی در این حالت که، از نوع ناخالصی p می باشد داریم :

$$\sigma_n = 0 \Rightarrow j_c = \sigma \cdot E = (\sigma_p + \sigma_n) \cdot E$$

$$\Rightarrow j_c = (\sigma_p) \cdot E = p q \mu_p E = p(x) q \mu_p E(x)$$

$$\Rightarrow j_c + j_d = 0 \Rightarrow \text{در حالت تعادل}$$

$$\Rightarrow j_c = -j_d \Rightarrow p(x) q \mu_p E(x) = d_p q \frac{dp(x)}{dx} \Rightarrow$$

$$E(x) = \frac{d_p}{\mu_p} \times \frac{1}{p(x)} \times \frac{dp(x)}{dx}$$

ب) محاسبه میدان ناشی از الکترون ها :

با توجه به نوع خالصی در این حالت که، از نوع ناخالصی n می باشد داریم :

$$\sigma_p = 0 \Rightarrow j_c = \sigma \cdot E = (\sigma_p + \sigma_n) \cdot E$$

$$\Rightarrow j_c = (\sigma_n) \cdot E = n q \mu_n E = n(x) q \mu_n E(x)$$

$$\Rightarrow j_c + j_d = 0 \Rightarrow \text{در حالت تعادل}$$

$$\Rightarrow j_c = -j_d \Rightarrow n(x) q \mu_n E(x) = -d_n q \frac{dn(x)}{dx} \Rightarrow$$

$$E(x) = \frac{-d_n}{\mu_n} \times \frac{1}{n(x)} \times \frac{dn(x)}{dx}$$

➤ معرفی ثابت اینیشتین :

برای ساده تر شدن روابط فوق ثابتی را بنام ثابت اینشتین معرفی نموده و آن را با V_T نشان می دهیم. این ثابت در دمای مطلق یا دمای اتاق یا دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و یا ۳۰۰ درجه کلونین، برابر با ۲۶ میلی ولت می باشد. (توجه داشته باشید که ۲۶ میلی ولت را گاهی اوقات برای سادگی در مسائل ۲۵ میلی ولت نیز اختیار می کنند).

$$V_T = \frac{d_p}{\mu_p} \triangleq \frac{d_n}{\mu_n} \triangleq \frac{kt}{q} = 26 \text{ mv}$$

بنابراین خواهیم داشت :

$$\Rightarrow E(x) = \frac{V_T}{p(x)} \times \frac{dp(x)}{dx} \quad \text{میدان ناشی از حفره ها}$$

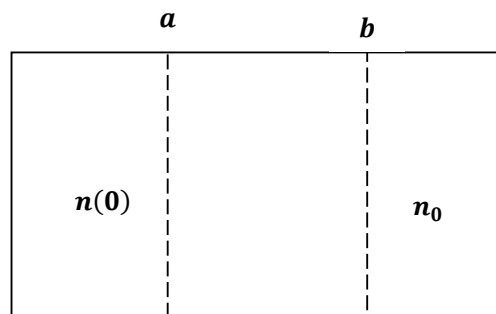
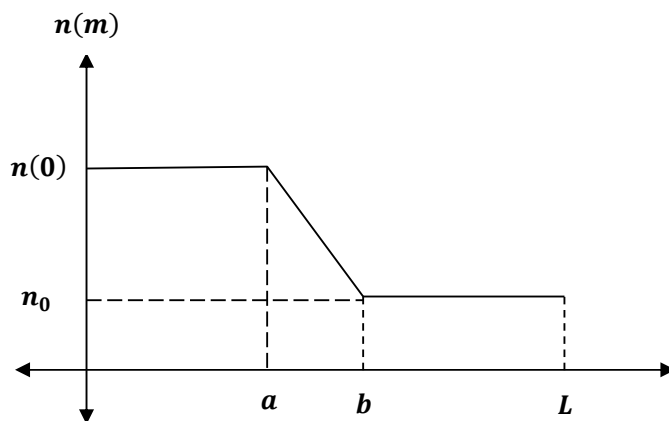
$$\Rightarrow E(x) = \frac{-V_T}{n(x)} \times \frac{dn(x)}{dx} \quad \text{میدان ناشی از الکترون ها}$$

مثال (با توجه به نمودار شکل زیر :

الف) $E(x)$ را در طول نیمه هادی تعیین نمایید .

ب) اگر بخواهیم اختلاف پتانسیل بین نقاط a, b در دمای ۳۰۰ درجه کلونین برابر با ۱۸۰ میلی ولت گردد ، مطلوبست

محاسبه نسبت $\frac{n(0)}{n_0}$ ؟



حل : به شکل زیر توجه کنید :

$$\Rightarrow E(x) = \frac{-V_T}{n(x)} \times \frac{dn(x)}{dx} \quad \text{میدان ناشی از الکترون ها}$$

$$n(x) = \begin{cases} n(0) & ; 0 < x < a \\ -\frac{n(0) - n_0}{b - a}(x - b) + n_0 = Ax + B & ; a < x < b \\ n_0 & ; b < x < L \end{cases}$$

$$E(x) = \frac{-V_T}{n(x)} \times \frac{dn(x)}{dx} = \begin{cases} 0 & ; 0 < x < a \\ \frac{-V_T}{Ax + B} \times A = \frac{-V_T}{x + \frac{B}{A}} & ; a < x < b \\ 0 & ; b < x < L \end{cases}$$

ب) در قسمت ب ابتدا بهتر رابطه زیر را یادآوری کنیم :

$$E(x) = \frac{-dv(x)}{dx} \quad \& \quad v_{ab} = 180 \text{ mv}$$

$$E(x) = \frac{-dv(x)}{dx} \Rightarrow v(x) = - \int E(x) dx \Rightarrow v(x) = - \int \left(\frac{-V_T}{n(x)} \times \frac{dn(x)}{dx} \right) dx$$

$$\Rightarrow v(x) = \int V_T \times \frac{dn(x)}{n(x)} = V_T \ln(n(x)) \quad \& \quad v_{ab} = 180 \text{ mv}$$

$$v_{ab}(x) = \int_b^a \left(V_T \times \frac{dn(x)}{n(x)} \right) = V_T (\ln(n(a)) - \ln(n(b))) = V_T \ln \left(\frac{n(a)}{n(b)} \right)$$

$$v_{ab}(x) = V_T \ln \left(\frac{n(a)}{n(b)} \right) = V_T \ln \left(\frac{n(0)}{n_0} \right) = 180 \Rightarrow 26 \ln \left(\frac{n(0)}{n_0} \right) = 180$$

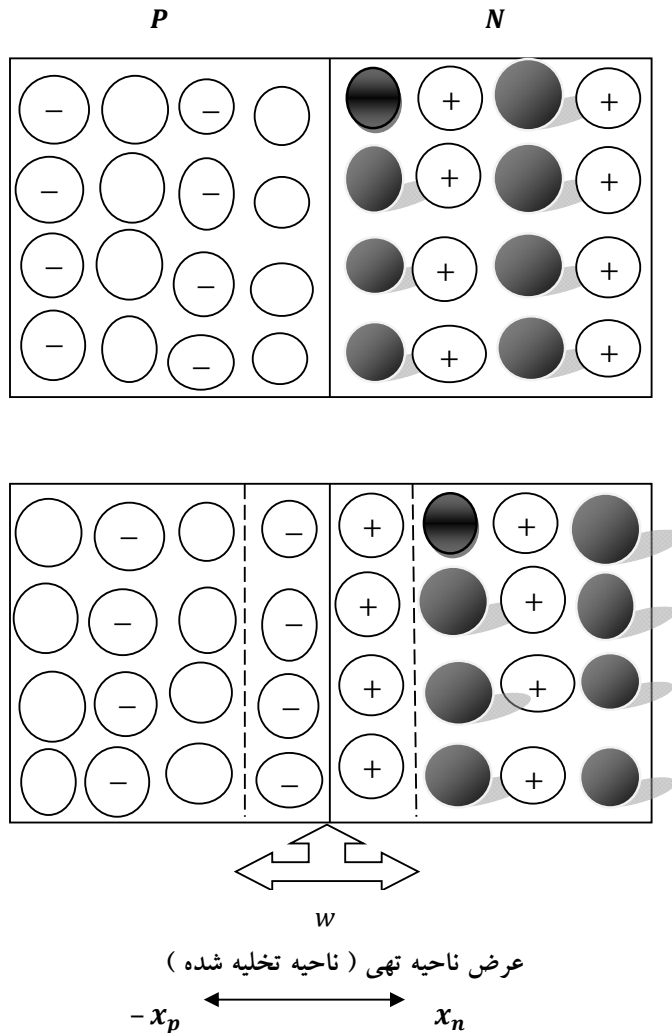
$$\Rightarrow \frac{n(0)}{n_0} = 1015$$

➤ اتصال پیوند P - N :

یادآوری : انواع ناخالصی ها :

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{دهنده : } N_d (danner) \Rightarrow N \text{ نوع} \\ \text{پذیرنده : } (Acceptor) \Rightarrow N_A \Rightarrow P \text{ نوع} \end{array} \right.$$

به اشکال زیر توجه کنید :



v_0 : اختلاف پتانسیل : پتانسیل ترمزی : پتانسیل تماس بین نقاط x_n , $-x_p$ می باشد که ایجاد گردیده است و از انتشار حامل ها جلوگیری می نماید که در ادامه به محاسبه مقدار آن می پردازیم :

به کمک سه رابطه زیر داریم :

$$\Rightarrow E(x) = \frac{V_T}{p(x)} \times \frac{dp(x)}{dx}$$

میدان ناشی از حفره ها

$$\Rightarrow E(x) = \frac{-V_T}{n(x)} \times \frac{dn(x)}{dx}$$

$$E(x) = \frac{-dv(x)}{dx}$$

$$E(x) = \frac{-dv(x)}{dx} \Rightarrow v(x) = - \int E(x) dx \Rightarrow v(x) = - \int \left(\frac{V_T}{p(x)} \times \frac{dp(x)}{dx} \right) dx$$

$$\Rightarrow v(x) = - \int V_T \times \frac{dp(x)}{p(x)} = -V_T \ln(p(x)) \quad \& \quad v_0 = v_{-x_p x_n} \Rightarrow$$

$$v_0 = v_{-x_p x_n} = - \int_{-x_p}^{x_n} \left(V_T \times \frac{dp(x)}{p(x)} \right) = -V_T \left(\ln(p(x_n)) - \ln(p(-x_p)) \right) \Rightarrow$$

$$v_0 = v_{-x_p x_n} = -V_T \ln \left(\frac{p(x_n)}{p(-x_p)} \right) \Rightarrow \begin{cases} p(x_n) = \frac{n_i^2}{n_d} \\ p(-x_p) = N_A \end{cases} \Rightarrow v_0 = V_T \ln \left(\frac{N_A \times N_d}{n_i^2} \right)$$

باید توجه داشته باشیم که برای اینکه بخواهیم بر سطح غلبه کنیم باید بر سطح پتانسیل تماس غلبه نماییم .

مثال (برای سیلیکن با مقادیر داده شده زیر پتانسیل تماس را محاسبه نمایید .

$$N_A = N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \quad \& \quad n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}, \quad V_T = 25 \text{ mV}$$

حل : برای یافتن پتانسیل تماس فقط کافی است که مقادیر داده شده را در فرمول جایگذاری نماییم پس :

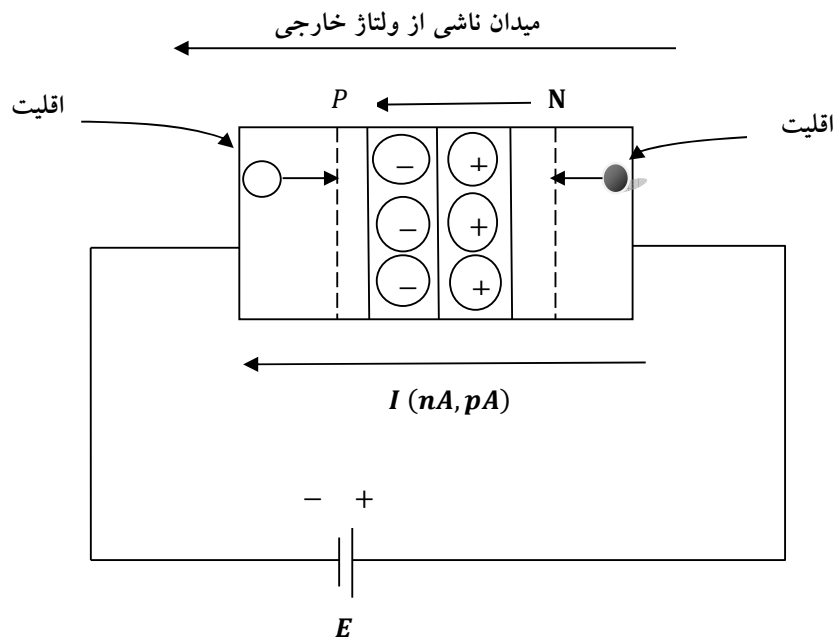
$$v_0 = V_T \ln \left(\frac{N_A \times N_d}{n_i^2} \right) = 25 \ln \left(\frac{10^{30}}{10^{20}} \right) = 0.6 \text{ volt}$$

➤ اتصال پیوند P - N به ولتاژ خارجی :

الف (پیوند P - N معکوس (Reverse) :

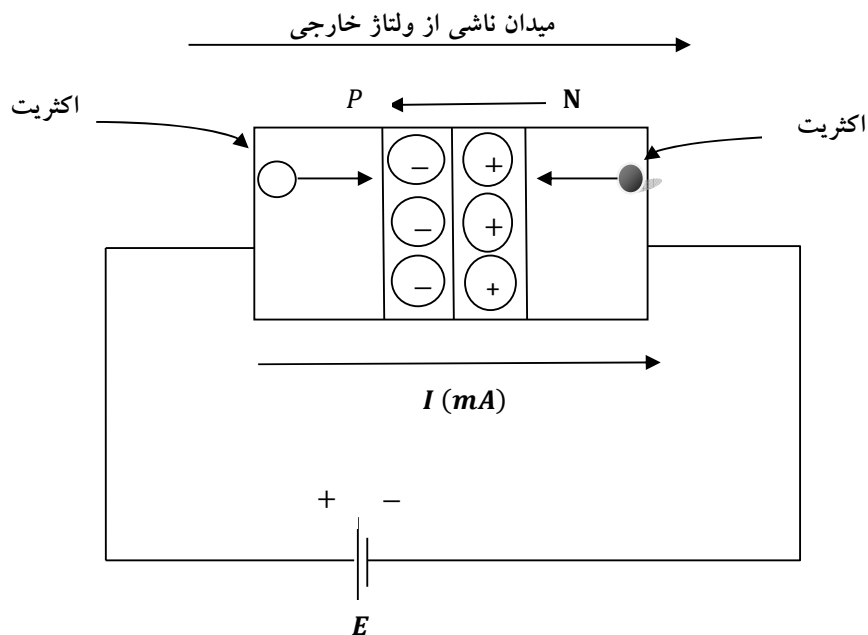
در این حالت ولتاژ خارجی سد پتانسیل را تقویت نموده و ناحیه تخلیه بزرگتر و پهن تر می گردد و هم چنین در این وضعیت تنها حاملان اقلیت یعنی حفره های ناحیه n و الکترونهای ناحیه p باعث جاری شدن یک جریان کوچک از سمت ناحیه n به سمت p می شوند که در حد نانو یا پیکو آمپر می باشد که به این بایاس ، بایاس معکوس یا **Reverse** گویند .

تذکر : همانطوریکه در شکل مشاهده می نمایید میدان داخلی و میدان خارجی ناشی از ولتاژ خارجی همدیگر را تقویت می کنند .



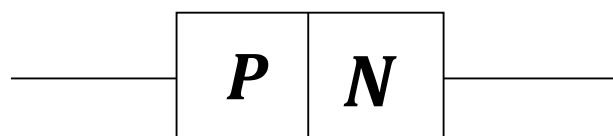
ب) پیوند P - N مستقیم (Forward):

در این حالت با جهت ولتاژ خارجی که اعمال کرده ایم می توانیم بر سد پتانسیل غلبه نموده و الکترونهای ناحیه n که اکثریت هستند به سمت p و حفره های ناحیه p که باز هم اکثریت هستند به سمت n حرکت کرده و یک جریان بزرگ در $Range$ میلی آمپر از p به n جاری شود که به این حالت بایاس ، بایاس مستقیم یا $Forward$ می گویند .
در این حالت ممکن است جریان داشته باشیم ، اگر بتوانیم بر ولتاژ سد پتانسیل غلبه نماییم .
یعنی ولتاژ خارجی را بتواند سد پتانسیل را بشکند . (میدان داخلی و خارجی عکس هم هستند)

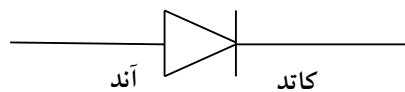


فصل دوم : معرفی دیود (دیود نیمه هادی)

با توجه به مقدماتی که در رابطه با پیوند $P - N$ در فصل اول داشتیم هم اکنون سراغ دیود نیمه هادی خواهیم رفت . بهتر است بدانیم که اگر بتوانیم بر ولتاژ آستانه که همان ولتاژ تماس می باشد، غلبه کنیم جریانی از P به N جاری خواهد شد .

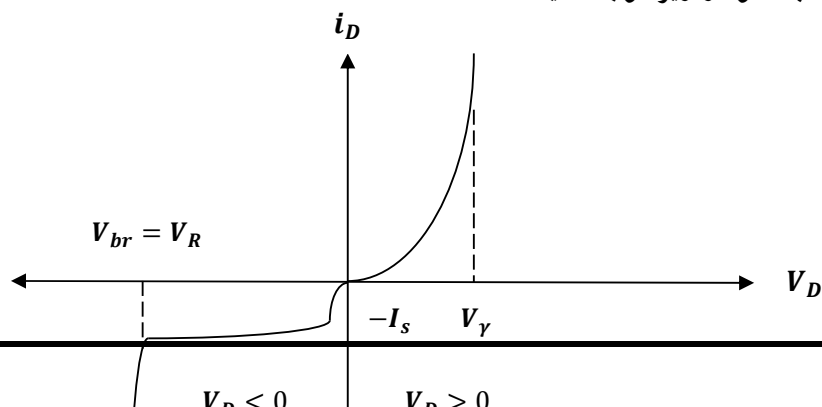


ولتاژ آستانه = ولتاژ تماس : V_0



❖ معرفی دیود :

برای معرفی دیود به نمودار زیر توجه کنید :



Forward Area

توجه داشته باشید که اگر ولتاژ را خیلی خیلی کم نماییم به یک ولتاژ بنام ولتاژ شکست می رسم و در این لحظه پیوند شکسته و جریان در راستای مخالف خیلی زیاد می شود (ناحیه شکست) . و هم چنین اگر ولتاژ را زیاد نماییم جریان هم خیلی خیلی بالا می رود . (رابطه کلی در دیود)
✓ رابطه کلی برای دیود

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

❖ نکاتی در رابطه فوق :

(۱) رابطه فوق یک رابطه کلی برای دیود می باشد یعنی هم برای ناحیه مستقیم و هم برای ناحیه مستقیم قابل قبول می باشد .

(۲) I_S نشان دهنده جریان اشباع معکوس می باشد که در حد پیکو و یا نانو آمپر می باشد .

$$1 < \eta < 2 \Rightarrow \begin{cases} \eta_{Silicon} = 1.4 \\ \eta_{Germanium} = 1 \end{cases} \Rightarrow \eta = 1 \text{ : اگر داده نشد}$$

$$V_T = 26 \text{ mv} \left(300K^\circ, 25^\circ C \text{ دمای اتاق} \right)$$

در ناحیه مستقیم از تقریب بالایی برخوردار هستیم ، البته در صورت وجود شرایط لازم :

$$Forward \Rightarrow V_D > 0 \text{ \& } V_D \gg \eta V_T \Rightarrow i_D = I_S e^{\frac{V_D}{\eta V_T}}$$

در ناحیه معکوس نیز خواهیم داشت :

$$Reverse \Rightarrow V_D < 0 \text{ \& } V_D \ll \eta V_T \Rightarrow i_D = -I_S$$

همانطوریکه می دانیم $V_{br} = V_R$: ولتاژ منفی می باشد که اگر به پیوند داده شود پیوند شکسته می شود .

$$V_\gamma \Rightarrow \begin{cases} Silicon \Rightarrow V_\gamma = 0.6 \text{ or } 0.7 \\ Germanium \Rightarrow V_\gamma = 0.1 \text{ or } 0.2 \end{cases}$$

اگر ولتاژ به ولتاژ خاصی به نام ولتاژ آستانه برسی جریان به صورت ناگهانی تغییر خواهد نمود . V_γ

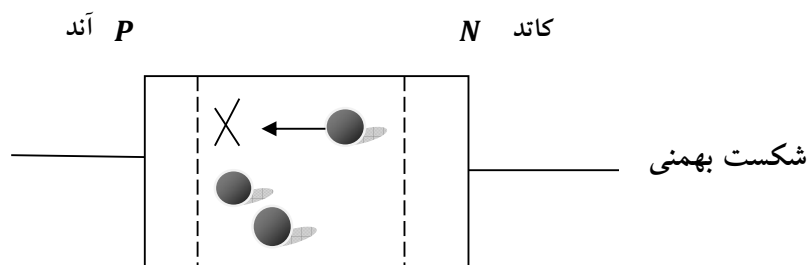
❖ انواع شکست ها :

(۱) شکست بهمنی (Avalanch) ، (۲) شکست زنری (Zener)

(۱) شکست بهمنی: در این شکست میزان ناخالصی کم، عرض ناحیه تهی زیاد و هم چنین $V_R > 6$ می باشد.

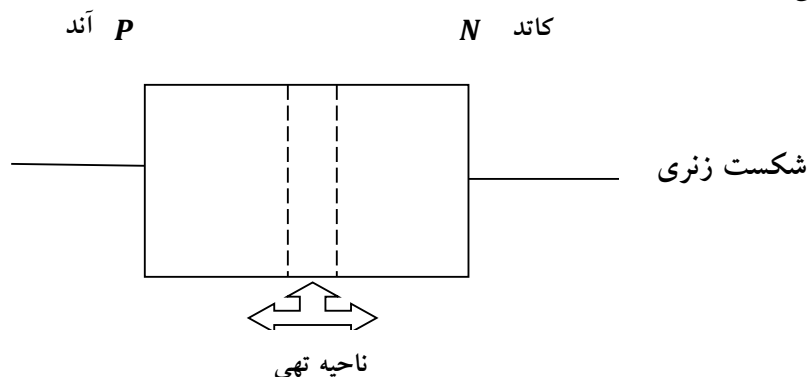
(۲) شکست زنری: در این شکست میزان ناخالصی زیاد، عرض ناحیه تهی کم و هم چنین $V_R < 6$ می باشد.

به اشکال زیر در رابطه با شکست ها توجه کنید: << شکست بهمنی >>



تذکر: توجه داشته باشید که در حالت شکست ناحیه تهی ۱ ژ معکوس داده شده که این ولتاژ باعث تولید الکترونهای با سرعت بالا می شود که با برخوردهای متداول کوالان الکترونهای زیادی را تولید کرده که این الکترونهای زیاد باعث تولید جریان زیاد می شوند و هم چنین الکترونهای زیاد همواره در حال تکرار می باشند که این موضوع در شکل نشان داده شده است.

شکست زنری:

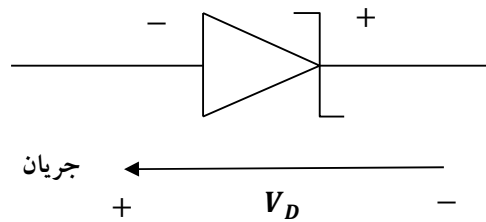


تذکر: توجه داشته باشید که در حالت شکست زنری با افزایش ولتاژ معکوس، پیوند می شکند و هم چنین در این حالت سرعت گرفتن الکترون معنایی ندارد چرا که عرض ناحیه تهی همانطوریکه در شکل هم مشاهده می شود، خیلی کم می باشد.

❖ معرفی دیود زنری

دیودی را که در ناحیه شکست کار می کند را دیود زنری گویند و همیشه بایاس معکوس می شود و در مدار به شکل زیر مورد استفاده قرار می گیرد.

$$V_Z$$



❖ بیان دو نکته مهم :

(۱) اثر دما بر مقدار جریان اشباع معکوس (I_S): هر ۱۰ درجه افزایش دما مقدار جریان اشباع معکوس را دو برابر می نماید یعنی :

$$I_{S2} = I_{S1} \times 2^{\left(\frac{T_2 - T_1}{10}\right)}$$

(۲) افزایش یک درجه دما موجب کاهش دو نیم میلی ولت در ولتاژ دیود می گردد یعنی :

$$\Delta V_D = -2.5 \text{ mv} \times \Delta T$$

تذکر : دو نکته فوق برای شکست های بهمنی و زنری صادق می باشد و فقط در مقدار V_R تفاوت دارند .

❖ مقاومت های دیود

دیود در شرایط متفاوت مداری ، از خودش مقاومت های متفاوت را نشان می دهد . در این مبحث می خواهیم دو نوع از مقاومت های دیود بنام های مقاومت استاتیکی و مقاومت دینامیکی را به شما معرفی کنیم .

(۱) مقاومت استاتیکی (*Static Resistant*)

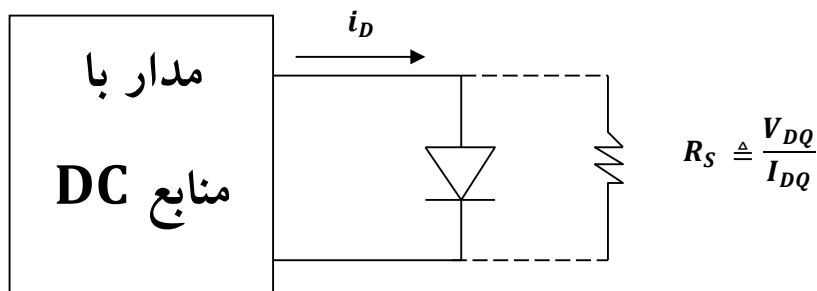
این نوع مقاومت در مدارهایی که شامل منابع DC می باشد ، به صورت زیر تعریف می گردد .

$$R_S \triangleq \frac{V_{DQ}}{I_{DQ}}$$

R_S یک عدد ثابت می باشد ولی به ازای نقاط کاری متفاوت دیود ، مقاومت استاتیکی نیز تغییر می نماید .

می توان بیان کرد که نسبت ولتاژ و جریان دیود در یک نقطه کاری همان بیانگر مقاومت

استاتیکی می باشد . (Q نشان دهنده نقطه کاری دیود می باشد.)

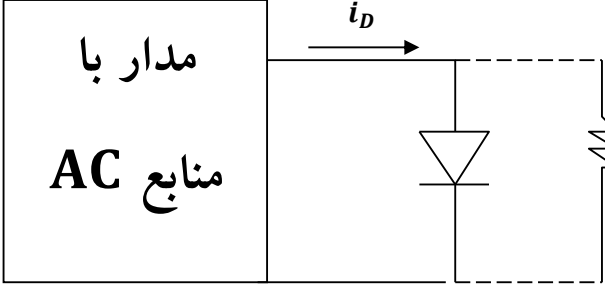


تعریف نقطه کاری دیود :

نقطه ای که دیود می تواند در آن کار کند را نقطه کاری دیود گویند که این نقطه کاری بستگی به شرایط مداری خواهد داشت و بهتر است بدانید که دیود در نقطه های کاری متفاوت در ازای شرایط مداری متفاوت کار می نماید .

(۲) مقاومت دینامیکی (Dynamic Resistant)

در حالتی که ورودی منابع AC داشته باشیم این نوع از مقاومت خود را نشان داده و برابر است با عکس شیب خط مماس بر منحنی مشخصه در نقطه کار دیود .



$$i_D = I_S (e^{\eta v_T} - 1) \Rightarrow r_d = \left(\frac{\partial i_d}{\partial v_d} \right)^{-1} \Rightarrow$$

$$r_d = \left(\frac{\partial i_d}{\partial v_d} \right)^{-1} = \frac{\eta V_T}{I_S \cdot e^{\frac{v_D}{\eta V_T}}} \cong \frac{\eta V_T}{I_S \cdot e^{\frac{v_D}{\eta V_T}} - I_S + I_S} \cong \frac{\eta V_T}{I_{DQ} + I_S} \Rightarrow$$

$$r_d = \left(\frac{\partial i_d}{\partial v_d} \right)^{-1} \cong \frac{\eta V_T}{I_{DQ}}$$

محدودیت کار با دیود :

(۱) جریان و ولتاژ ماکزیمم $V_D < V_{D\ max} \ \& \ I_D < I_{D\ max}$

(۲) توان ماکزیمم $V_D \cdot I_D < P_{max}$

(۳) حداکثر سرعت سوئیچینگ (هرگز I_{max} و $V_{D\ max}$ با هم نداریم)

❖ خلاصه :

- (۱) جریان اشباع معکوس در دیوهای ژرمانیوم نسبت به دیوهای سیلسکن بیشتر است.
- (۲) دو پدیده فیزیکی ضرب بهمینی و زنر در شکست یک دیود با بایاس معکوس دخالت دارند .
- (۳) برای کاربرد هر دیود در مدارهای الکترونیکی باید به مقادیر نامی داده شده در کتابهای اطلاعات دیود توجه نمود .
- (۴) از دیود زنر در مدارهای تنظیم ولتاژ برای تثبیت ولتاژ استفاده می شود. بایاس این دیود باید به صورت معکوس باشد .

۵) دیود نورانی در مدار به صورت مستقیم بایاس می شود .
در این دیود انرژی ناشی از ترکیب مجدد حفره و
الکترونهای آزاد به صورت تابش فوتونهای نورانی آزاد
می شود .

۶) دیود نوری در وضعیت بایاس معکوس در مدار قرار می
گیرد . در این دیود افزایش شدت نور باعث ازدیاد
جریان حامل های اقلیت می شود .

۷) در یک دیود با بایاس معکوس ، جریان برابر جریان
اشباع معکوس I_S است . (قبل از ناحیه شکست) .

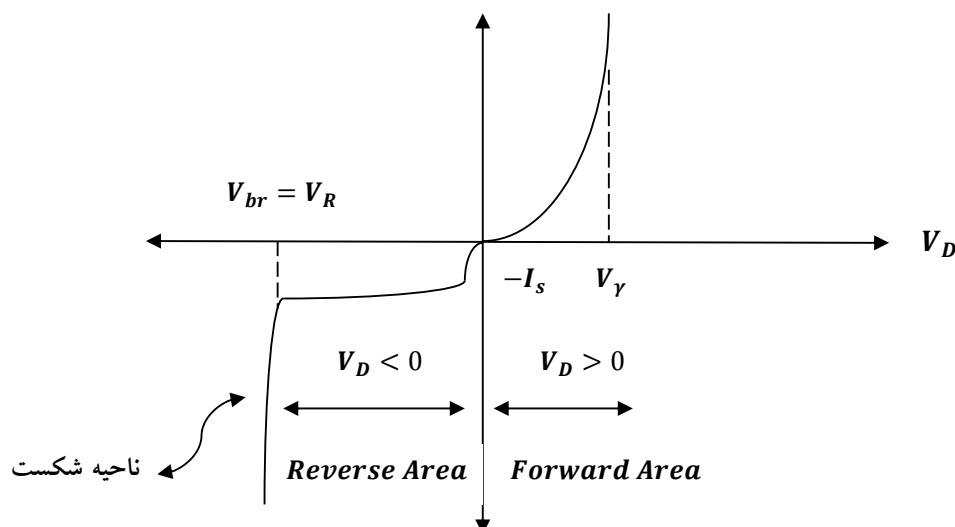
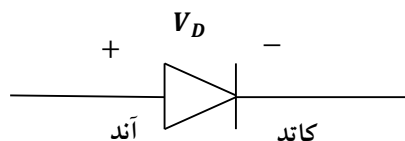
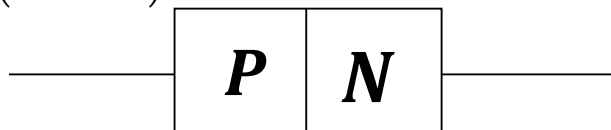
✓ انواع دیود ها

۱) دیود معمولی :

برای این دیود یک شماتیک مداری معرفی خواهیم کرد و هم چنین در رابطه با شماتیک
بازاری آن نیز صحبت خواهیم کرد . (کاربرد در یکسو سازی و سوئیچینگ)

شماتیک مداری و رابطه کلی آن :

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right)$$



ظاهرا قطعه ای مشکی رنگ و استوانه ای شکل می باشد که یک نوار سفید رنگ در نوک دیود قرار دارد که نوک سفید رنگ نشان دهنده نوک کاتد می باشد .

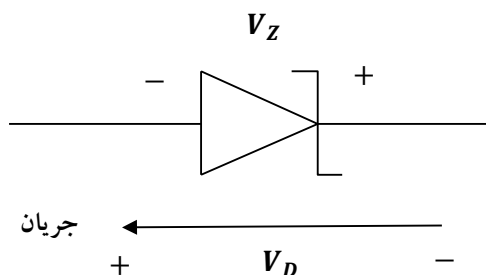


1N400 1

1N400 2 ...

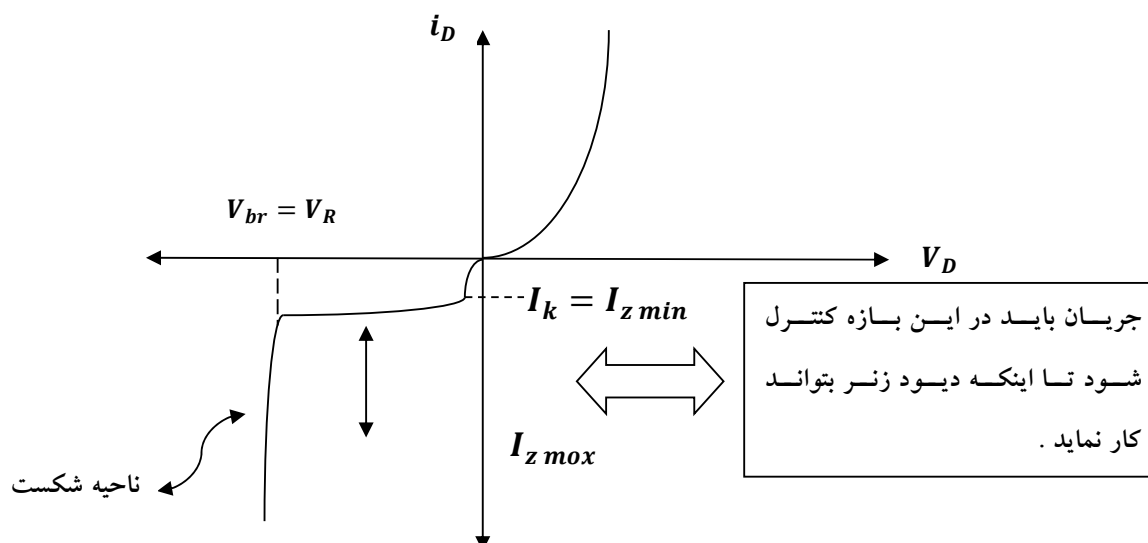
(۲) دیود زنر :

کاربرد در رگلاتور ولتاژ: یعنی متغیر کننده را ثابت می کند . هر کجا بخواهیم متغیر متناوبی را ثابت نماییم از دیود زنر استفاده می شود . (این دیود همواره بایاس معکوس می شود) .
دیودی را که در ناحیه شکست کار می کند را دیور زنری گویند و همیشه بایاس معکوس می شود و شماتیک مداری آن به صورت زیر می باشد .

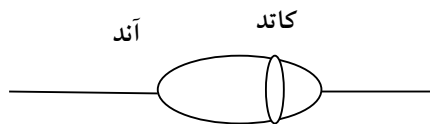


$$2.4 \text{ volt} < V_Z < 200 \text{ volt}$$

$$p_z \leq 1000 \text{ وات}$$



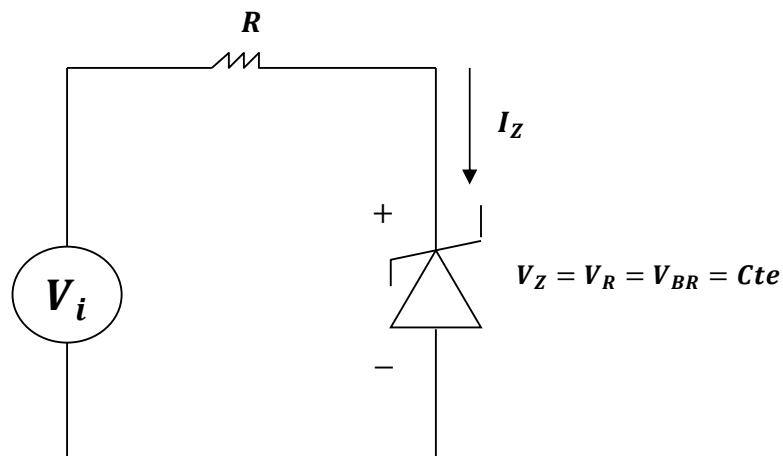
از لحاظ ظاهری نیز کوچک و شیشه ای و نوک قرمز رنگ دارند. (نوک قرمز رنگ نوک کاتد را نشان می دهد).



4.7

5.6 , 7.5 ...

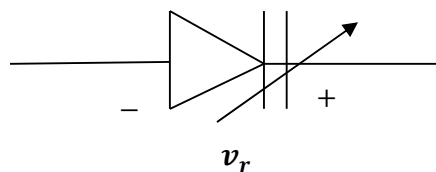
➤ طرز کار دیود زبر :



$$\text{Condition : } \begin{cases} v_i > v_z \\ v_z = cte \\ I_k < I_D < I_{Z \text{ Max}} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_{min} = \frac{v_{i \text{ min}} - v_z}{R} > I_k \\ I_{min} = \frac{v_{i \text{ max}} - v_z}{R} < I_{Z \text{ max}} \end{cases}, v_o = v_z$$

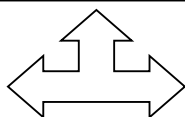
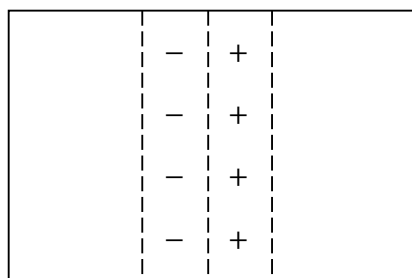
(*varactor Diode*) دیود خازنی (۳)

شماتیک مداری :



P

N



عرض ناحیه تهی

روابط حاکم بر این دیود :

$$C_T = \epsilon \times \frac{A}{W} \Rightarrow C_T = C_{T0} \left(1 + \frac{V_r}{V_0}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$C_T = \left(\frac{q \epsilon N_A N_D}{2V_0(N_A + N_D)} \right)^{\frac{1}{2}}$$

هر گاه پیوند $P - N$ به صورت معکوس بایاس شود . یک ناحیه تهی و با بار فضایی متشکل از بارهای ساکن در N و بارهای ساکن در P به وجود می آید . نواحی خنثی که حامل های آزادند مانند هادی عمل ولتاژ تماس می کنند .

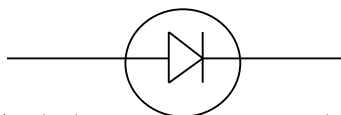
نواحی خنثی : دو جوشن خازن & ناحیه تهی : دی الکتریک خازن

در این حالت ظرفیت C_T با ولتاژ v_r کنترل می گردد . کار این دیود در بایاس معکوس بوده و کاربردی از این دیود در درس مدارهای مخابراتی و در مدلاتور FM می باشد .

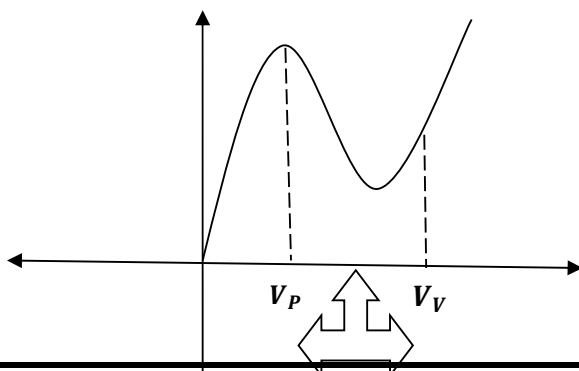
کاربردها : تنظیم ولتاژهای مدارهای تشدید LC در نوسان ساز مانند مقاومت معکوس

۴) دیود تونلی

شماتیک مداری :



کاربردها : دیود تونلی در مدارهای مدولاسیون فرکانس و هم چنین در مدارهایی که با افزایش ولتاژ ، جریان کمی می خواهیم مورد استفاده می شود .



کاربرد دیود تونلی فقط

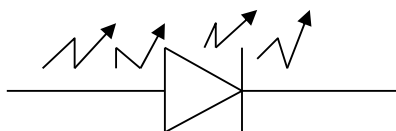
نکته :

در این حالت ورودی ولتاژ بین V_P و V_V می باشد و شبیه یک مقاومت منفی عمل کرده که از آن در ساخت نوسانگر های فرکانس در مدارهای مخابراتی مورد استفاده قرار می گیرد .

۱) دیود نورانی LED (light Emmited Diode)

نمونه کاربرد این دیود در صفحات نورانی تبلیغاتی در سطح شهر می باشد که در صورت دادن ولتاژ به این نوع دیودها صفحاتی نورانی برای ما تولید می کنند .

شماتیک مداری :



با توجه به اینکه دیود LED همراه با فوتو دیود کار می کند ، ششمین نوع دیود را برای شما معرفی می کنیم .

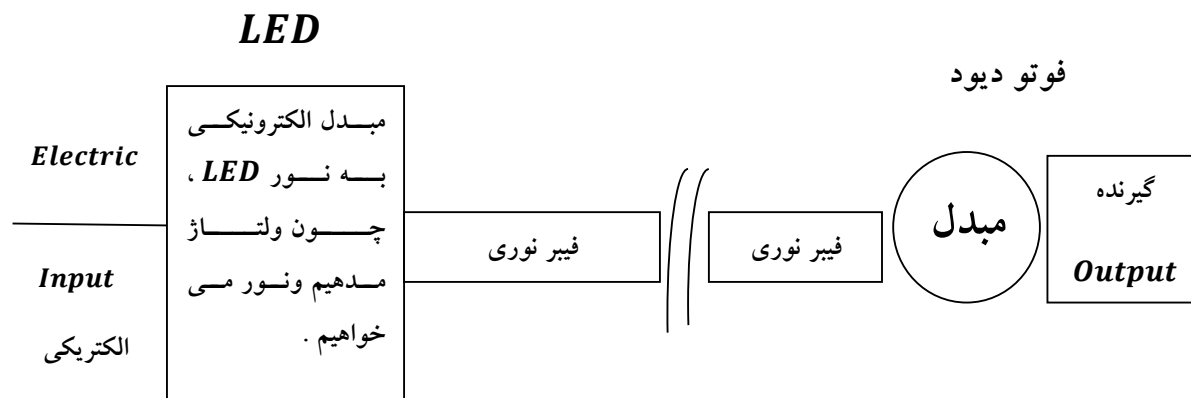
۲) فوتو دیود

اگر نور بر این نوع دیود بتابد بر دو سر آن ولتاژ ایجاد می گردد .

دیود نورانی و فوتو دیود ها با هم استفاده می شوند (عکس هم هستند) به عنوان مثال مورد استفاده در فیبر نوری نمونه دیگر کاربرد از فوتو دیودها در باز کردن درها ، فوتوسل ها که در خانه ها مورد استفاده قرار می گیرد

* توجه داشته باشید که فوتو دیود به صورت معکوس بایاس می شود . (دیود نوری)

کاربرد : فیبر نوری و شبکه های نوری مخابرات ... در شکل زیر به نمونه کاربرد دیود و فوتو دیود می پردازیم :



نمونه فوق ، یک نمونه کاربرد از دیود و فوتو دیود در فیبر نوری در کاربردهای مخابراتی می باشد.

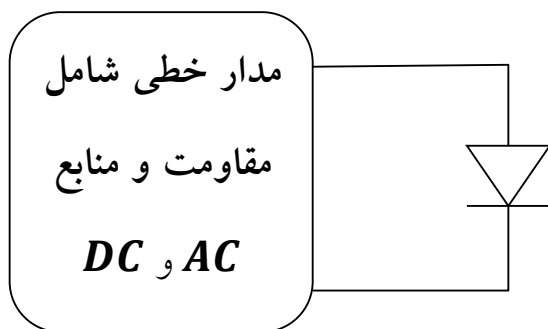
❖ فصل سوم : بررسی و تجزیه و تحلیل مدارهای دیودی

در فصل های اول و دوم در رابطه با پیدایش دیود و هم چنین کاربردهای آن در صنعت و الکترونیک صحبت کردیم، هم اکنون می خواهیم به بررسی و تحلیل مدارهای دیودی (مدارهای شامل دیود) پردازیم. برای این امر، این تجزیه و تحلیل را به دو قسمت، مدارهای شامل یک دیود و مدارهای شامل بیش از یک دیود تقسیم بندی می کنیم و برای هر یک راهکارهایی ارائه خواهیم داد. بنابراین دسته بندی زیر را برای تجزیه و تحلیل مدارهای دیودی خواهیم داشت :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{روش ترسیمی (1)} \\ \Rightarrow \text{شامل یک دیود} \Rightarrow \text{مدارهای خطی شامل تنها یک عنصر غیر خطی (1)} \\ \text{روش تحلیلی (2)} \\ \Rightarrow \text{روش استفاده از تقریب های مناسب برای دیود} \Rightarrow \text{شامل دیودها} \Rightarrow \text{مدارهای شامل بیش از یک عنصر غیر خطی (2)} \end{array} \right.$$

ابتدا از مدارهای شامل یک دیود به بررسی و تجزیه و تحلیل خواهیم پرداخت. توجه داشته باشید که دو روش ترسیمی و تحلیلی بستگی به داده های مداری و مسئله دارد و مراحل ۳ گامی که برای حل مدارهای تک دیودی گفته می شود تقریباً در هر دو روش مشابه می باشد. هم اکنون سراغ روش ۳ گام می رویم.

✓ الف (مدار خطی شامل یک عنصر غیر خطی (مدارهای شامل تنها یک دیود)



در شکل روبرو یک مدار در حالت کلی مشاهده

می کنید برای تجزیه و تحلیل این نوع مداری، یعنی برای به دست آوردن نقطه کاری دیود مراحل سه گام در زیر معرفی می شوند.

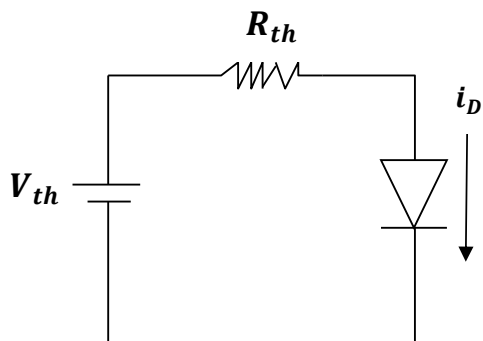
مراحل ۳ گام :

گام اول : رسم مدار معادل تونن از دو سر دیود (از مدار مورد نظر)

در این مرحله احتیاج به V_{th} و R_{th} داریم برای یافتن آنها به یادآوری زیر که از درس مدارهای الکتریکی ۱ می باشد، توجه کنید :

یافتن R_{th} : برای این منظور در مدار داده شده تمامی منابع مستقل را صفر کرده و سپس مقاومت معادل را محاسبه می کنیم. در واقع در مدار داده شده هر آنچه که باعث حیات و کارکرد مدار بود را (همان منابع مستقل مدار) از بین می بریم و سپس به محاسبه مقاومت معادل که همان مقاومت تونن می باشد می پردازیم.

یافتن V_{th} : برای محاسبه V_{th} دو سر شبکه (که همان دیود می باشد) را باز می کنیم و سپس ولتاژ مدار باز حاصل را که بنام $v_{oc} = \text{voltage, open circuit}$ می باشد را محاسبه می کنیم.



گام دوم: نوشتن قانون KVL در مدار معادل تونن

$$V_D = V_{th} - R_{th}i_D \Rightarrow I_D = \frac{V_{th} - V_D}{R_{th}} \quad \text{خط بار } DC$$

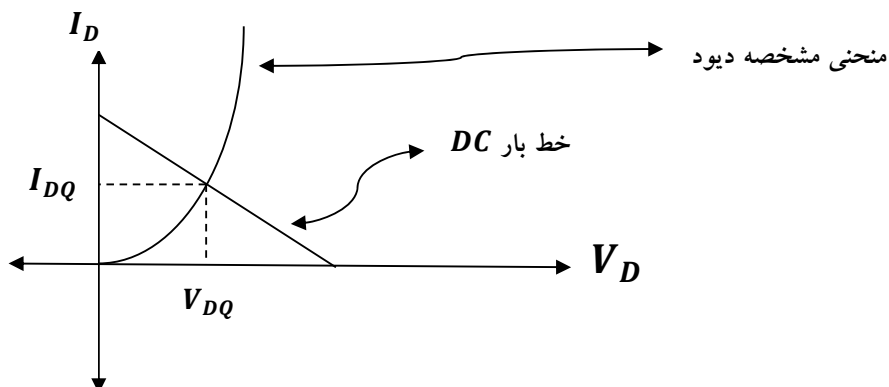
گام سوم: نوشتن و یا رسم منحنی مشخصه دیود

در این مرحله موارد کاربرد روش ترسیمی و روش تحلیلی بیان می گردد.

۱) اگر منحنی مشخصه دیود جزء مفروضات مسئله بود و مسئله آن را داده بود به کمک رسم خط بار

DC که در گام دوم به دست آوردیم، نقطه کار دیود را از تلاقی دادن رسم خط بار DC و منحنی

مشخصه دیود به دست می آوریم که این روش بنام روش ترسیمی معروف می باشد.



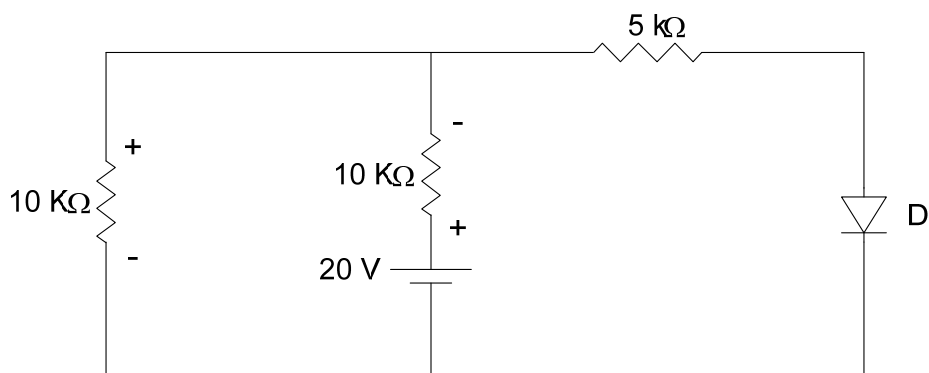
۲) اگر در مفروضات مسئله به ما I_S & ηV_T را داده بود، باید برای یافتن نقطه کار دیود از روش تحلیلی به صورتی که بیان می شود استفاده کنیم. در این روش ابتدا معادله شماره ۱ که همان خط بار DC که در گام دوم یافتیم را نام گذاری می کنیم و سپس از رابطه کلی دیود معادله شماره ۲ را استخراج می کنیم و سپس به کمک مفروضات مسئله آن را تکمیل می نماییم و در نهایت برای یافتن نقطه کار دیود معادلات شماره ۱ و ۲ را به روش عددی که توضیح داده خواهد شد حل نموده و نقطه کار دیود را به دست می آوریم.

$$V_D = V_{th} - R_{th}i_D \Rightarrow I_D = \frac{V_{th} - V_D}{R_{th}} \quad , \quad DC \text{ خط بار (معادله شماره 1)}$$

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right) \Rightarrow V_D = \eta V_T \ln \left(\frac{I_D}{I_S} \right) \quad , \quad (2 \text{ معادله شماره 2})$$

هم اکنون معادلات شماره ۱ و ۲ را به روش عددی حل می کنیم. برای این امر ابتدا حدس اولیه برای V_D را که مقدار $V_D = 0.7$ می باشد را در معادله شماره ۱ قرار داده و یک مقدار I_D به دست می آوریم و سپس مقدار I_D به دست آمده را در معادله شماره ۲ قرار داده و مقدار V_D' را به دست می آوریم، اگر مقدار V_D' با مقدار V_D که همان حدس اولیه می باشد نزدیک بود یا اختلاف خیلی کمی داشت نقطه کار دیود $Q(I_D, V_D)$ خواهد بود در غیر این صورت باید V_D' را در معادله شماره ۱ قرار داده و سپس I_D' جدید را یافته و در معادله شماره ۲ قرار داده تا اینکه V_D'' را بیابیم و به مقایسه آن با مقدار حدس پردازیم، اگر مقدار بدست آمده با مقداری که حدس زده بودیم اختلاف زیادی نداشت نقطه کار دیود به دست آمده است در غیر این صورت باید این مراحل را تکرار کرد تا اینکه نقطه کار دیود را با تقریب درستی به دست آوریم.

مثال ۱: در مدار زیر نقطه ی کار (Q) را بیابید.



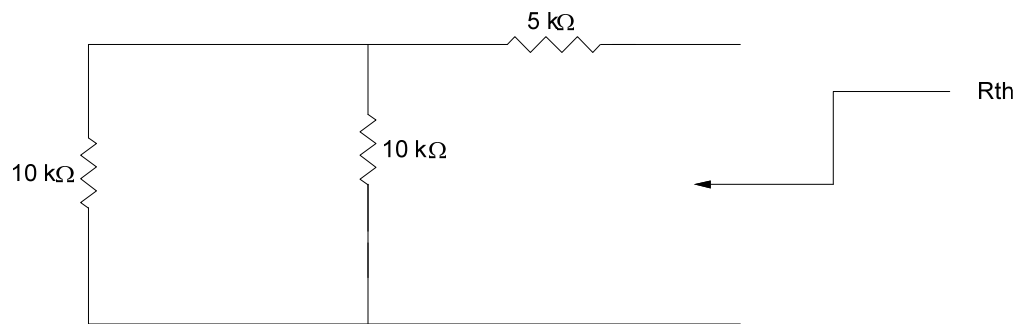
$$nV_T = 25mV$$

$$I_S = 10^{-13} A$$

حل : برای بدست آوردن نقطه کار باید مراحل ۳ گام را انجام دهیم .

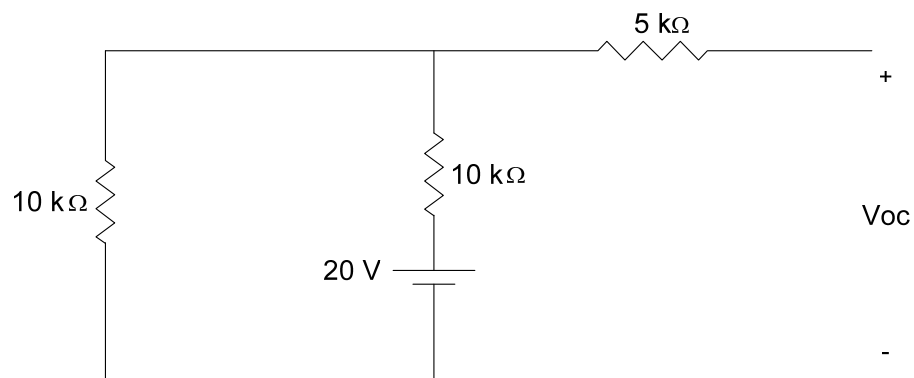
گام اول : رسم مدار معادل تونن از دو سر دیود (از مدار مورد نظر)

برای بدست آوردن مدار معادل تونن باید R_{th} و V_{th} را بدست آوریم :



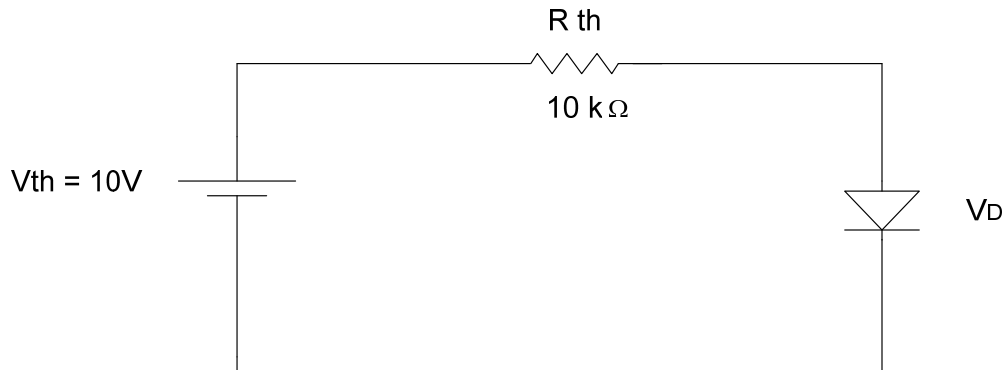
$$R_{th} = (10 \parallel 10) + 5 = 10K\Omega$$

یافتن V_{th} : با استفاده از قاعده تقسیم ولتاژ V_{th} را به دست می آوریم :



$$V_{oc} = V_{th} = (20) \times \frac{10}{10 + 10} = 10V \Rightarrow V_{th} = 10V$$

بدین ترتیب مدار معادل تونن را می نویسیم .



گام دوم : نوشتن قانون K_{vi} در مدار معادل تونن

$$I_D = \frac{V_{th} - V_D}{R_{th}} = \frac{10 - V_D}{10K}$$

گام سوم : نوشتن معادله دیود :

$$i_D = I_S (e^{\frac{V_D}{nV_r}} - 1) \Rightarrow V_D = nV_r \ln\left(\frac{I_D}{I_S}\right) = 25 \times 10^{-3} \ln\left(\frac{I_D}{10^{-3}}\right)$$

$$\Rightarrow (1) I_D = \frac{10 - V_D}{10K}$$

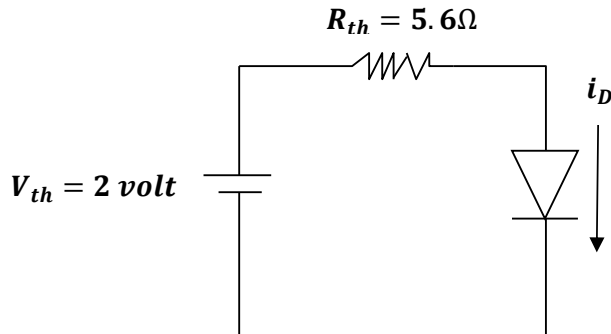
$$(2) V_D = 25 \times 10^{-3} \ln\left(\frac{I_D}{10^{-3}}\right)$$

با حل این معادلات (معادلات شماره ۱ و ۲) به روش عددی می توان نقطه کار را بدست آورد که در نهایت

برای نقطه کار دیود خواهیم داشت :

$$Q(0/94mA, 0/574Volt) \Rightarrow V_D = 0/574V \quad I_D = 0/94mA$$

مثال 2) در مدار شکل زیر دیود از جنس سیلیکون به همراه مشخصات $I_S = 1.9 \text{ nA}$ ، $\eta V_T = 42.8 \text{ mV}$ مفروض است. مطلوبست تعیین نقطه کار دیود ؟



حل : به کمک مراحل سه گام خواهیم داشت :

گام اول : گام اول در مسئله جزء مفروضات می باشد .

$$R_{th} = 5.6 \Omega , V_{th} = 2 \text{ Volt}$$

گام دوم : نوشتن قانون KVL در مدار معادل تونن

$$V_D = V_{th} - R_{th} i_D \Rightarrow I_D = \frac{V_{th} - V_D}{R_{th}} = \frac{2 - V_D}{5.6} , \quad \text{خط بار } DC \quad (\text{معادله شماره 1})$$

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right) \Rightarrow V_D = \eta V_T \ln \left(\frac{I_D}{I_S} \right) \Rightarrow V_D = 42.8 \ln \left(\frac{I_D}{1.9} \right) , \quad (\text{معادله شماره 2})$$

روش مورد استفاده با توجه به مفروضات مسئله روش تحلیلی می باشد . حال به حل معادلات شماره ۱ و ۲ به کمک روش حل عددی می پردازیم .

$$\text{معادله شماره 1} \Rightarrow V_D = 0.7 \xrightarrow{\text{معادله شماره 2}} I_D = 232 \text{ mA} \xrightarrow{\text{معادله شماره 1}} V_D = 0.797 \text{ Volt}$$

$$\Rightarrow V_D = 0.797 \xrightarrow{\text{معادله شماره 1}} I_D = 215 \text{ mA} \xrightarrow{\text{معادله شماره 2}} V_D = 0.794 \text{ Volt}$$

$$\Rightarrow V_D = 0.794 \xrightarrow{\text{معادله شماره 1}} I_D = 215 \text{ mA} \xrightarrow{\text{معادله شماره 2}} V_D = 0.794 \text{ Volt}$$

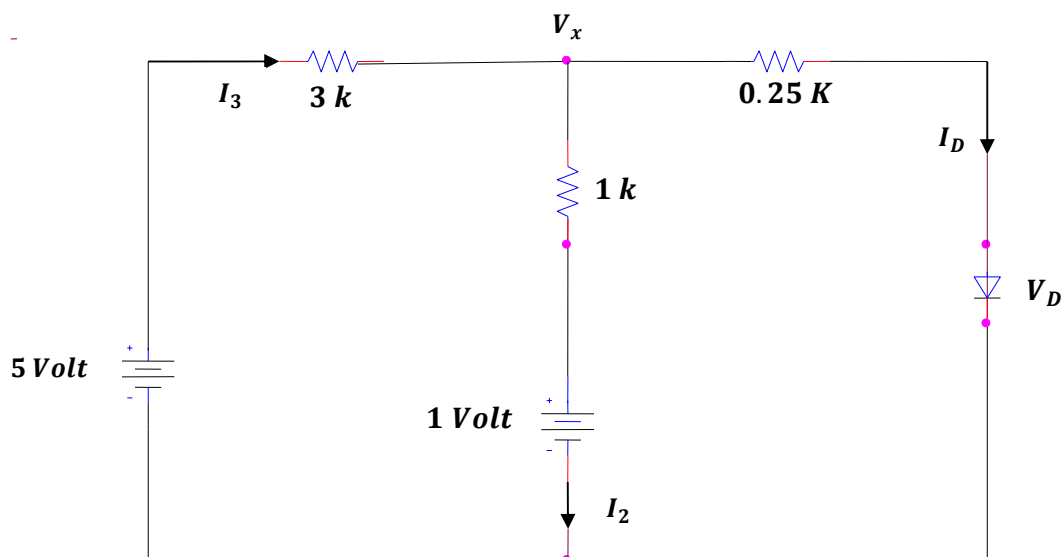
بنابراین نقطه کار دیود عبارت است از :

$$Q(215 \text{ mA}, 0.794 \text{ volt})$$

تذکر : برای محاسبات در حل معادلات به روش عددی حتما به واحد های داده شده برای مفروضات مسئله توجه کنید.

مثال 3) در مدار شکل زیر I_2 , I_3 , V_x را محاسبه کنید .

مفروضات مسئله : دیود از جنس سیلکن , $\eta V_T = 26 \text{ mV}$, $I_S = 10 \text{ nA}$

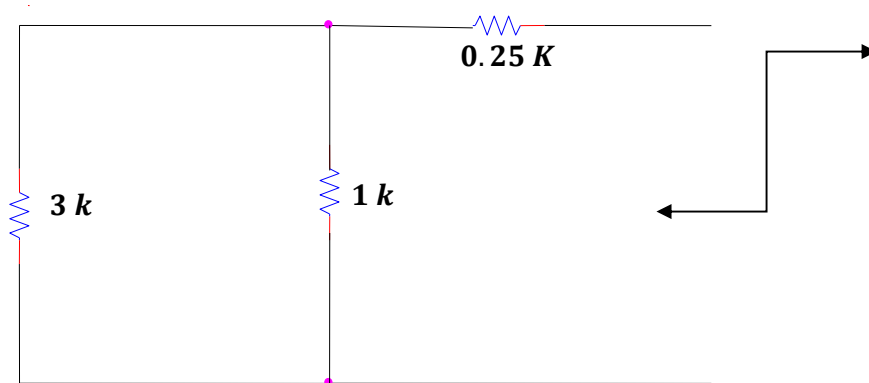


حل : در این مسئله به طور مستقیم از ما نقطه کار دیود خواسته نشده ولی همانطوریکه در شکل مشاهده می کنید برای یافتن مجهولات احتیاج به نقطه کار داریم چرا که مجهولات وابسته به نقطه کار می باشند . بنابراین ابتدا نقطه کار دیود را محاسبه می کنیم .

مراحل ۳ گام :

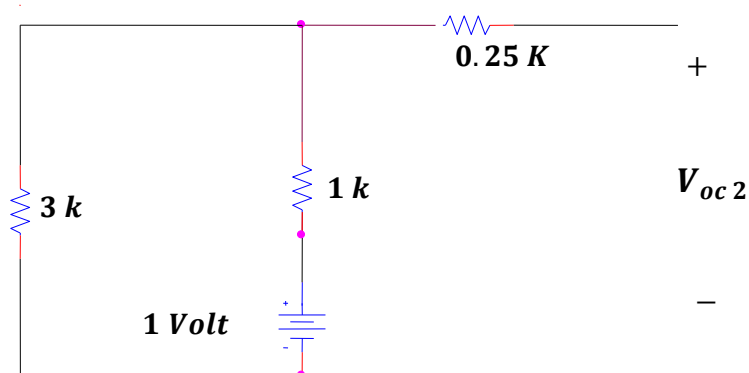
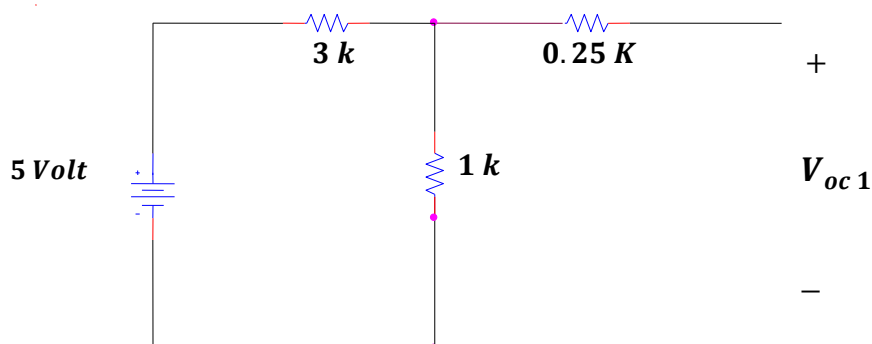
گام اول : رسم مدار معادل تونن از دو سر دیود

یافتن R_{th} :

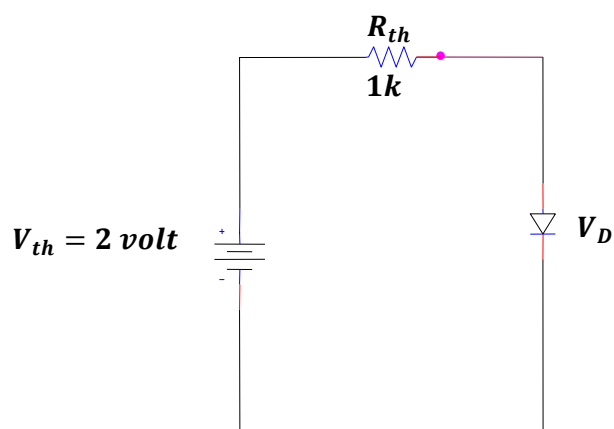


$$R_{th} = (3 \parallel 1) + 0.25 = 1K\Omega$$

یافتن V_{th} : برای یافتن V_{th} با توجه به مدارهای زیر از قانون جمع آثار به همراه قاعده تقسیم ولتاژ استفاده می کنیم .



$$\left\{ \begin{array}{l} v_{oc1} = 5 * \frac{1}{1+3} = \frac{5}{4} \text{ Volt} \\ v_{oc2} = 1 * \frac{3}{1+3} = \frac{3}{4} \text{ Volt} \end{array} \right. \Rightarrow V_{th} = v_{oc1} + v_{oc2} = \frac{5}{4} + \frac{3}{4} = \frac{8}{4} = 2 \text{ volt}$$



گام دوم: نوشتن قانون KVL در مدار معادل تونن

$$I_D = \frac{V_{th} - V_D}{R_{th}} = \frac{2 - V_D}{1} = 2 - V_D \quad , \quad \text{معادله شماره 1} \quad \text{خط بار DC}$$

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right) \Rightarrow V_D = \eta V_T \ln \left(\frac{I_D}{I_S} \right) \Rightarrow V_D = 26 \ln \left(\frac{I_D}{10nA} \right), \quad (\text{معادله شماره 2})$$

روش مورد استفاده با توجه به مفروضات مسئله روش تحلیلی می باشد. حال به حل معادلات شماره ۱ و ۲ به کمک روش حل عددی می پردازیم که در نهایت برای نقطه کار دیود خواهیم داشت:

$$Q(1.4 \text{ mA}, 0.6 \text{ volt}) \Rightarrow \begin{cases} V_D = 0.6 \text{ volt} \\ I_D = 1.4 \text{ mA} \end{cases}$$

هم اکنون با توجه به مدار داده شده در صورت سوال، مجهولات را به کمک قوانین کیرشهف به دست خواهیم آورد.

$$V_x = 0.25I_D + V_D = 0.95 \text{ volt} \Rightarrow \text{قانون } kvl \text{ شاخه سمت راست}$$

$$I_2 = \frac{V_x - 1}{1} = -0.05$$

$$I_3 = \frac{V_x - 5}{3} = -1.35$$

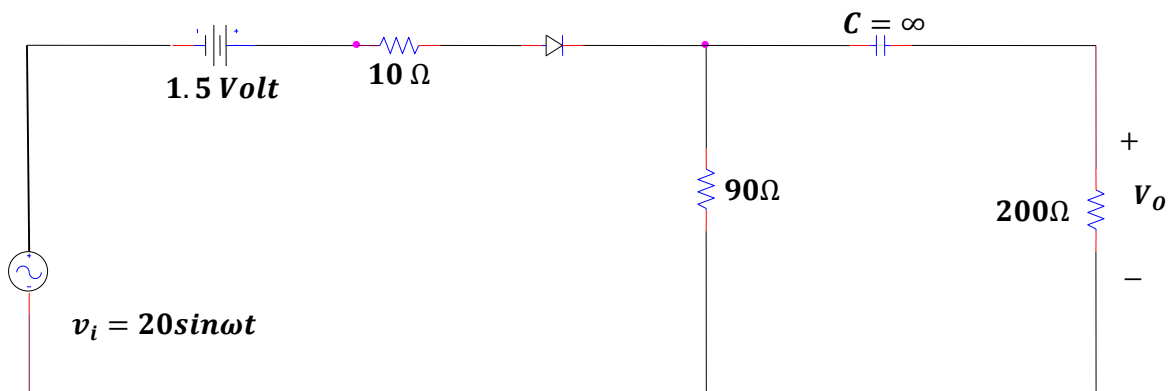
❖ مدارهای مقاومتی خطی شامل منابع AC, DC :

در حل این مدارها ابتدا باید تحلیل DC به کمک مراحل سه گام، را انجام داد تا اینکه نقطه کاری دیود را پیدا نماییم و سپس به کمک نقطه کاری دیود مقاومت دینامیکی را محاسبه کرده و در تحلیل AC جایگزین دیود نموده و سپس مجهولات مسئله را پیدا می نماییم.

$$r_d = \frac{\eta V_T}{I_{DQ}}$$

مثال ۴) در مدار شکل زیر مفروضات داده شده است مطلوبست محاسبه نقطه کاری دیود و V_O ؟

مفروضات مسئله: دیود از جنس سیلکن، $\eta V_T = 26 \text{ mV}$ ، $I_S = 10 \mu A$



حل : در حل این سوال به بیان یادآوری درسی تحلیل مدارهای دیودی شامل منابع AC & DC خواهیم پرداخت. در حل این طور مسائل ابتدا باید تحلیل DC را انجام داد تا اینکه نقطه کاری دیود را پیدا نماییم و سپس به کمک نقطه کاری دیود مقاومت دینامیکی را محاسبه کرده و در تحلیل AC جایگزین دیود نمود و سپس مجهولات مسئله را پیدا نماییم.

الف (تحلیل DC :

در تحلیل DC ، منابع AC خاموش و هم چنین خازنها در حالت مدار باز خواهند بود پس شکل مداری به صورت نشان داده شده در زیر خواهد بود :

در مدار شکل زیر به کمک مراحل سه گام خواهیم داشت :

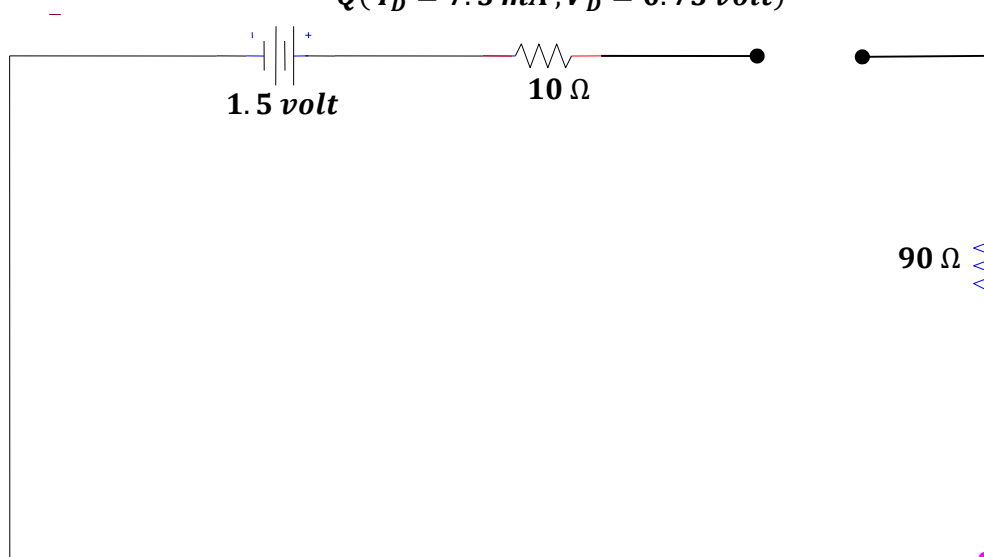
$$R_{th} = 90 + 10 = 100 \Omega \quad \& \quad v_{th} = 1.5 \text{ Volt}$$

$$I_D = \frac{V_{th} - V_D}{R_{th}} = \frac{1.5 - V_D}{0.1 \text{ k}} = 2 - V_D \quad , \quad \text{خط بار } DC \quad \left(\text{معادله شماره 1} \right)$$

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right) \Rightarrow V_D = \eta V_T \ln \left(\frac{I_D}{I_S} \right) \Rightarrow V_D = 26 \ln \left(\frac{I_D}{10 \mu A} \right) \quad , \quad \left(\text{معادله شماره 2} \right)$$

بعد از حل عددی معادلات شماره ۱ و ۲، نقطه کار دیود به صورت زیر یافت می شود .

$$Q(I_D = 7.5 \text{ mA}, V_D = 0.75 \text{ volt})$$



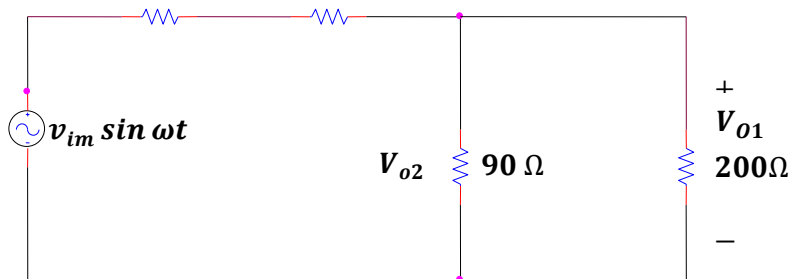
ب (تحلیل AC :

در تحلیل AC احتیاج به مقاومت دینامیکی خواهیم داشت به کمک قسمت الف حل داریم :

$$Q(I_D = 7.5 \text{ mA}, V_D = 0.75 \text{ volt}) \Rightarrow r_d = \frac{\eta V_T}{I_{DQ}} = \frac{26 \text{ mV}}{7.5 \text{ mV}} = 3.3 \Omega$$

مدار در تحلیل AC به صورت زیر خواهد بود .

$$10 \Omega \quad 3.3 \Omega$$



$$V_o(t) = V_o(DC) + V_o(AC) = 0 + V_o(AC) = V_o(AC) = 17^m \sin \omega t$$

$$V_o(AC) = \frac{V_{im} \sin \omega t (90 || 200)}{(90 || 200) + 10 + 3.3} = 17^m \sin \omega t$$

$$V_{o1}(t) = 0 + 17^m \sin \omega t = 17^m \sin \omega t$$

$$V_{o2}(t) = I_{DQ} * 90 + 17^m \sin \omega t = 675 \text{ mv} + 17^m \sin \omega t$$

نکته : در برخی از سوالات ممکن است به جای مقادیر ηV_T و I_S ، دو نقطه تست برای دیود داده باشند . در این صورت از رابطه زیر مقادیر ηV_T و I_S را محاسبه می کنیم .

$$\eta V_T = \frac{V_{D1} - V_{D2}}{\ln\left(\frac{I_{D1}}{I_{D2}}\right)}, \quad V_{D1} = \eta V_T \ln\left(\frac{I_{D1}}{I_S}\right)$$

اثبات : تصور کنید دو نقطه تست داده شده به صورت زیر مفروض باشند .

$$Q_1(I_{D1}, V_{D1}) \quad , \quad Q_2(I_{D2}, V_{D2})$$

V_D	I_D	$V_D = \eta V_T \ln\left(\frac{I_D}{I_S}\right)$
V_{D1}	I_{D1}	$V_{D1} = \eta V_T \ln\left(\frac{I_{D1}}{I_S}\right)$, معادله شماره 1
V_{D2}	I_{D2}	$V_{D2} = \eta V_T \ln\left(\frac{I_{D2}}{I_S}\right)$, معادله شماره 2

$$V_{D1} - V_{D2} = \eta V_T \left[\ln\left(\frac{I_{D1}}{I_S}\right) - \ln\left(\frac{I_{D2}}{I_S}\right) \right] = \eta V_T \left[\ln\left(\frac{\frac{I_{D1}}{I_S}}{\frac{I_{D2}}{I_S}}\right) \right] = \eta V_T \ln\left(\frac{I_{D1}}{I_{D2}}\right)$$

$$\Rightarrow V_{D1} - V_{D2} = \eta V_T \ln \left(\frac{I_{D1}}{I_{D2}} \right)$$

تذکر: با جایگذاری ηV_T در یکی از معادلات شماره ۱ و یا ۲ می توان مقدار I_S را محاسبه کرد.

تمرین:

در مدار شکل زیر فرض کنید:

$$\eta V_T = \frac{V_{D1} - V_{D2}}{\ln \left(\frac{I_{D1}}{I_{D2}} \right)}$$

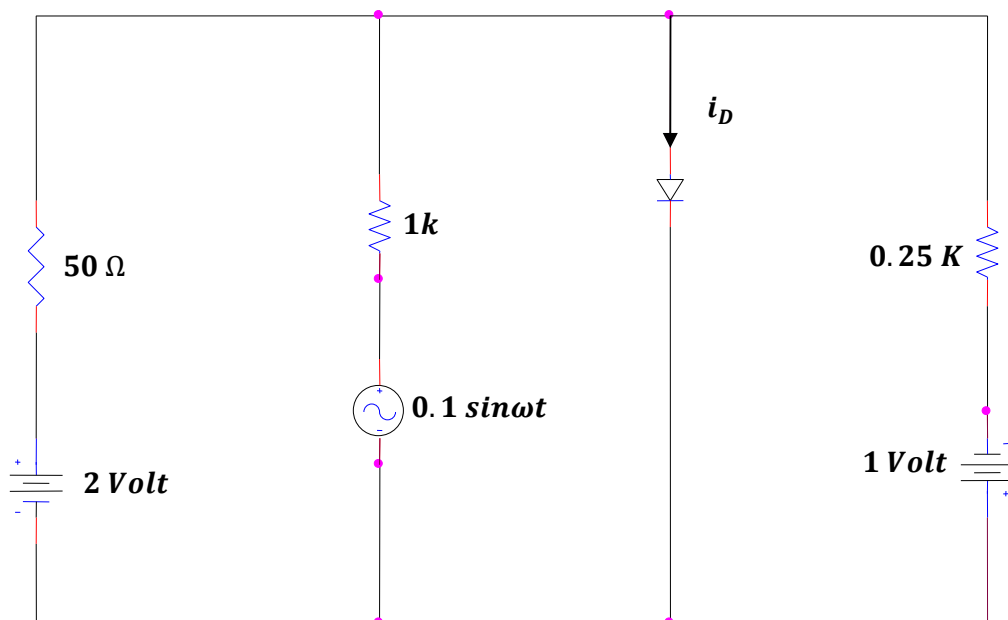
$$i_D = \begin{cases} 80(V_D - 0.6), & V_D \geq 0.6 \\ 0, & V_D \leq 0.6 \end{cases}$$

که در آن V_D بر حسب ولت و I_D بر حسب میلی آمپر می باشد. مطلوبست:

الف) مدار معادل تونن در دو سر دیود

ب) نقطه کار DC دیود.

پ) رابطه کلی ولتاژ دیود (راهنمایی: $V_{DC}(t) = v_d + v_D$)



➤ مدل های تقریبی دیود

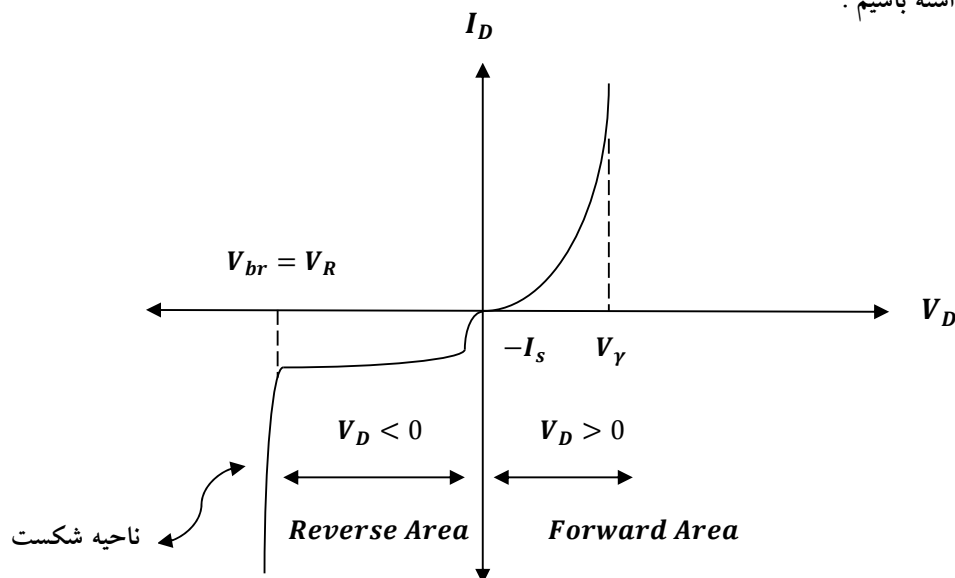
در این قسمت به تحلیل مدارهایی خواهیم پرداخت که شامل بیش از یک دیود هستند. به عبارت کامل تر هر گاه بخواهیم یک مدار خطی شامل بیش از یک دیود را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهیم باید از مدل های تقریبی دیود ها کمک بگیریم. برای این منظور به مدل های تقریبی دیود در زیر توجه کنید:

۱) مدل ایده آل

اولین مدل تقریبی را که برای دیود برای شما معرفی می کنیم، مدل تقریبی ایده آل برای دیود می باشد. قوانین این مدل تقریبی به قرار زیر است:

ابتدا قبل از اینکه قوانین این مدل تقریبی را ارائه کنیم بهتر است، یادآوری درباره با رابطه کلی و دیود و منحنی آن داشته باشیم.

یادآوری:

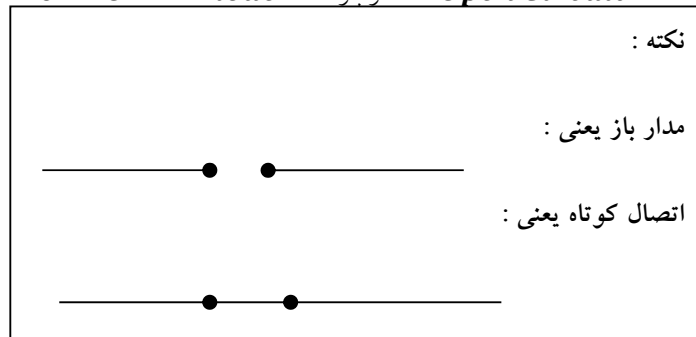
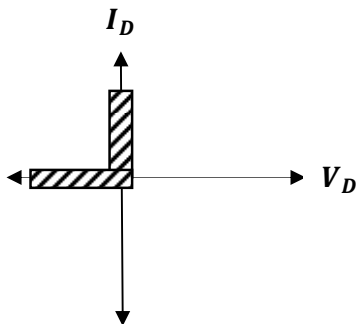


✓ رابطه کلی برای دیود

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

قوانین مدل تقریبی ایده آل :

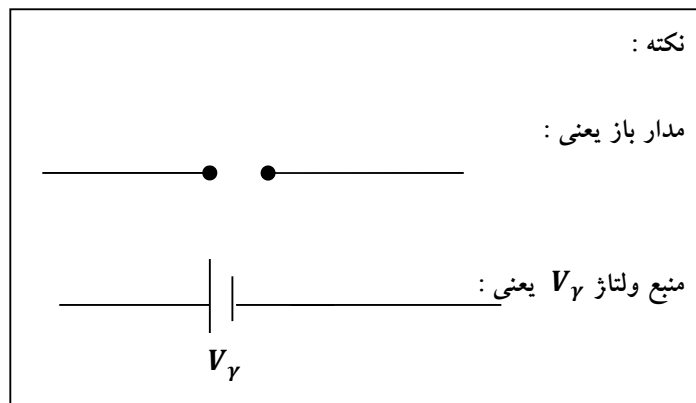
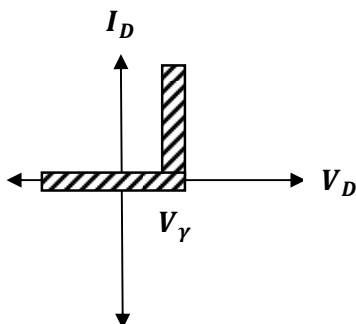
$$\Rightarrow \begin{cases} i_D > 0 \Rightarrow V_D = 0 \Rightarrow \text{ON : Diode} \Rightarrow \text{Short Circuit : اتصال کوتاه} \\ V_D < 0 \Rightarrow I_D = 0 \Rightarrow \text{OFF : Diode} \Rightarrow \text{Open Circuit : مدار باز} \end{cases}$$



۲) مدل تکه ای - قطعی :

قوانین حکفرما بر این مدل :

$$\Rightarrow \begin{cases} i_D > 0 \Rightarrow V_D = V_Y \Rightarrow \text{ON : Diode} \Rightarrow \text{منبع ولتاژ } V_Y \\ V_D < V_Y \Rightarrow I_D = 0 \Rightarrow \text{OFF : Diode} \Rightarrow \text{Open Circuit : مدار باز} \end{cases}$$

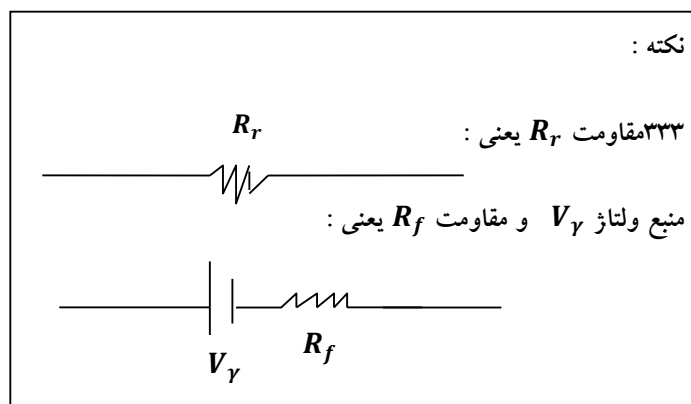
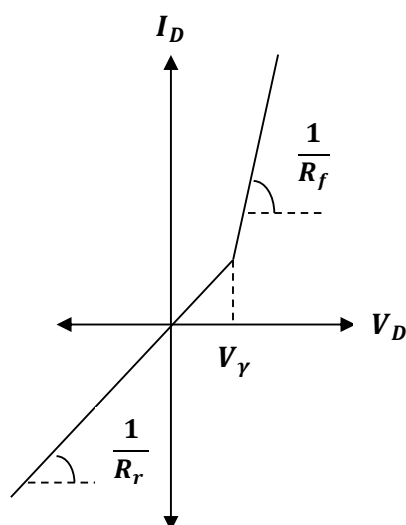


مدل سوم :

قوانین مکمفرما بر این مدل :

$$\Rightarrow \text{مدل سوم} \Rightarrow \begin{cases} i_D > 0 \Rightarrow V_\gamma \text{ And } R_f \Rightarrow ON : Diode \Rightarrow R_f \text{ و ولتاژ } V_\gamma \text{ منبع ولتاژ و مقاومت} \\ V_D < V_\gamma \Rightarrow OFF : Diode \Rightarrow R_r \text{ مقاومت} \end{cases}$$

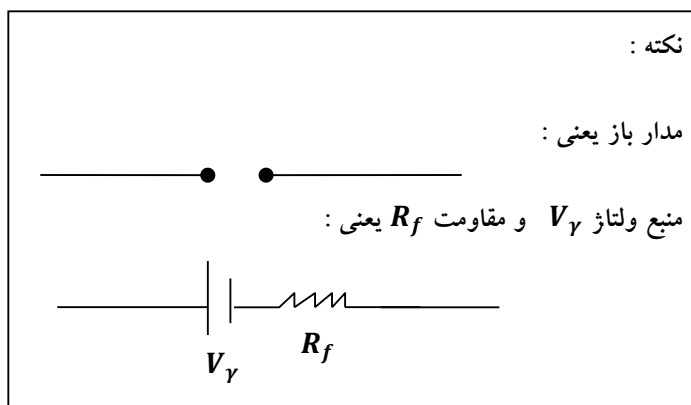
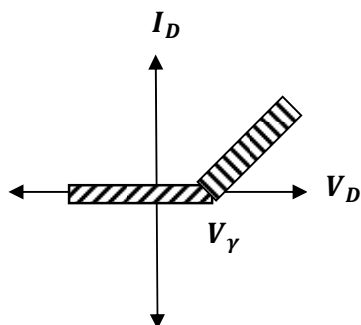
تذکر : مقاومت R_r ، مقاومتی است که در دیود در ناحیه معکوس از خود نشان می دهد و این مقاومت دارای مقدار خیلی بزرگ در حد مگا اهم می باشد . ولی مقاومت R_f ، مقاومتی است که دیود در ناحیه مستقیم از خود نشان می دهد و دارای مقدار بسیار کوچکی در حد ۲۰ الی ۳۰ اهم می باشد .



مدل چهارم :

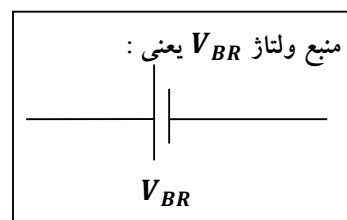
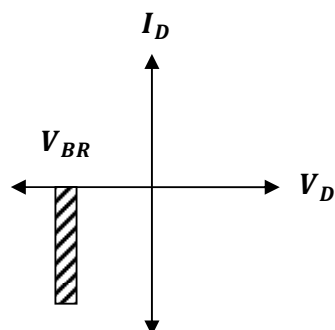
قوانین مکمفرما بر این مدل :

$$\Rightarrow \text{مدل چهارم} \Rightarrow \begin{cases} i_D > 0 \Rightarrow V_\gamma \text{ And } R_f \Rightarrow ON : Diode \Rightarrow R_f \text{ و ولتاژ } V_\gamma \text{ منبع ولتاژ و مقاومت} \\ V_D < V_\gamma \Rightarrow I_D = 0 \Rightarrow OFF : Diode \Rightarrow \text{open circuit : باز مدار} \end{cases}$$



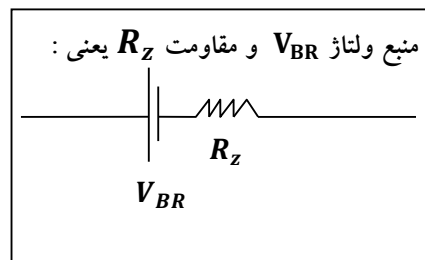
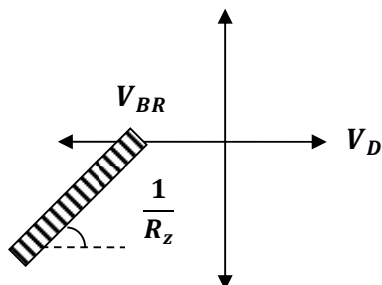
مدل پنجم : مدل تقریبی دیود در ناحیه شکست :

قوانین حکمفرما در این مدل :



$Diode \Rightarrow V_{BR}$ منبع ولتاژ

حالت دوم در این مدل :



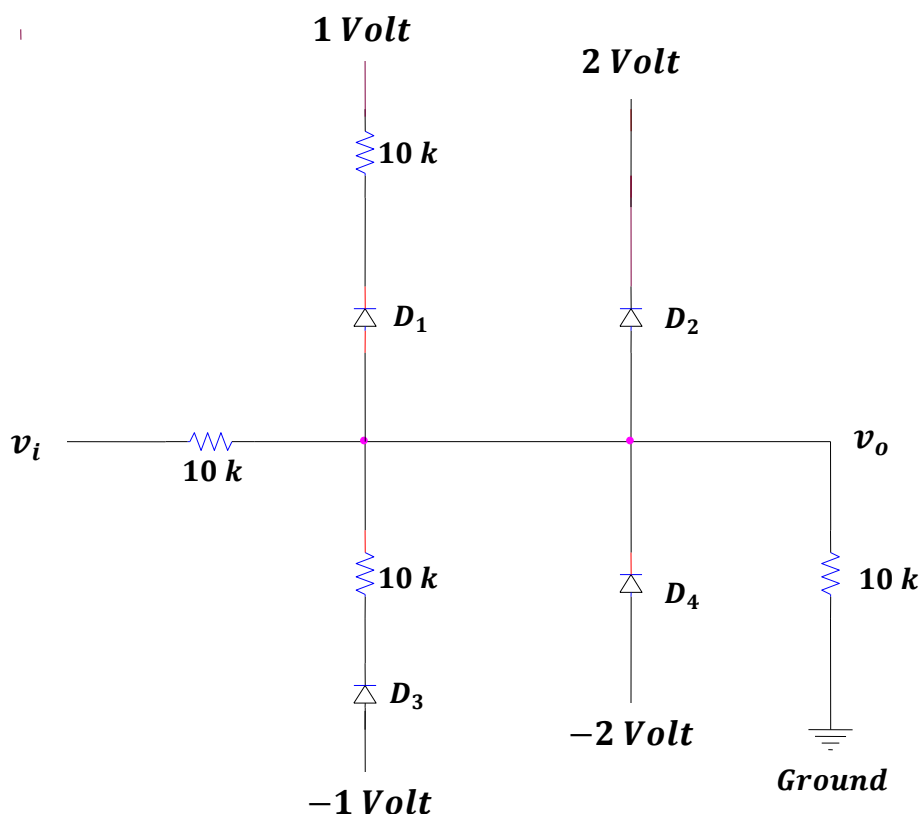
$Diode \Rightarrow V_{BR} \& R_z$

مثال ۵) در مدار شکل زیر با فرض اینکه دیود ها ایده آل باشند و با فرض اینکه $-4.5 < v_i < 4.5$

تغییر نماید . آنگاه محدوده تغییرات v_o کدام بازه می تواند باشد . (تست کنکور ارشد سال ۱۳۸۲)

- 1) $-2 \text{ Volt} < v_o < 2 \text{ Volt}$
- 2) $-1.5 \text{ Volt} < v_o < 1.5 \text{ Volt}$
- 3) $-2.2 \text{ Volt} < v_o < 2.2 \text{ Volt}$
- 4) $-1.83 \text{ Volt} < v_o < 1.83 \text{ Volt}$

n



حل : اگر سوال به صورت تستی نبود ، باید حالت‌های مختلف را در نظر گرفته و به طور کامل سوال را حل می کردیم تا اینکه به جواب می رسیدیم . اما در این جا با توجه به تستی بودن سوال هدف این است که نحوه حل تستی سوال را به شما گفته شود . بنابراین از گزینه ها نیز برای یافتن جواب کمک خواهیم گرفت .

در مدار شکل فوق دیدود ها ایده آل هستند و هم چنین سیگنال در محدوده $-4.5 < v_i < 4.5$ در حال تغییر می باشد و هدف ما یافتن تغییرات v_o می باشد. با فرضهای زیر حل مسئله را ادامه می دهیم .

$$v_i = -4.5 \text{ volt} \Rightarrow v_o < 0 \Rightarrow \begin{cases} D_1 : Off \\ D_2 : Off \end{cases} \Rightarrow$$

$$-2 < v_o < -1 \Rightarrow \begin{cases} D_3 : On \\ D_4 : Off \end{cases} \Rightarrow$$

v_o را محاسبه می کنیم اگر با حدس ما برابر بود ، پس حدس ما درست خواهد بود :

$$v_o = -4.5 * \frac{(10||10)}{10 + (10||10)} + (-1) * \frac{(10||10)}{10 + (10||10)} = -1.5 - \frac{1}{3}$$

$$\Rightarrow v_o = -1.83 \text{ volt}$$

$$v_i = +4.5 \text{ volt} \Rightarrow v_o < 0 \Rightarrow \begin{cases} D_3 : \text{Off} \\ D_4 : \text{Off} \end{cases} \Rightarrow$$

$$1 < v_o < 2 \Rightarrow \begin{cases} D_1 : \text{On} \\ D_2 : \text{Off} \end{cases} \Rightarrow$$

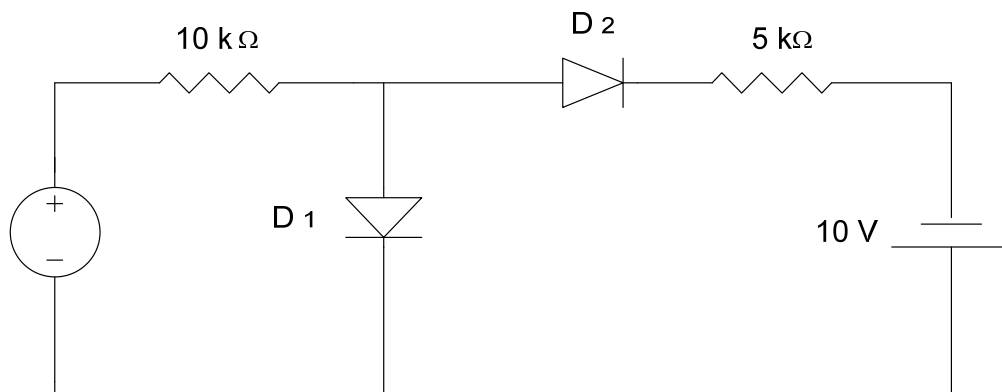
$$v_o = +4.5 * \frac{(10||10)}{10 + (10||10)} + (+1) * \frac{(10||10)}{10 + (10||10)} = 1.83 \text{ volt}$$

بنابراین گزینه چهارم صحیح می باشد .

مثال ۶: در مدار شکل زیر نقطه کار هر یک از دیود ها را تعیین نمائید

الف) از تبدیل به دیود ایده آل استفاده کنید .

ب) از تبدیل به دیود با $V_\gamma = 0.7$ استفاده کنید :

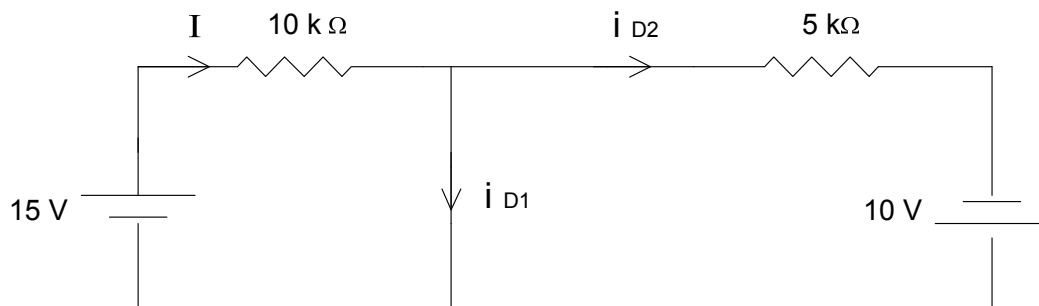


حل : ابتدا همه حالت های دیودها را می نویسیم :

حالت \ دیود	۱	۲	۳	۴
D1	ON	ON	Off	Off
D2	ON	Off	ON	Off

D1: منبع 15V سعی می کند دیود D1 را روشن کند ولی منبع 10V سعی دارد دیود را خاموش کند پس نمی توان در مورد D1 نظر قطعی دارد .

D2: هم منبع 15V و هم منبع 10V سعی دارند دیود D2 را روشن کنند پس دیود D2 همیشه روشن است .
از توضیحات بالا نتیجه می گیریم که فقط باید حالات ۱ و ۳ را بررسی کرد چون D2 همیشه روشن است .
ابتدا فرض می کنیم که حالت ۱ برقرار است .



$$I = \frac{15 - 0}{10k} = 1.5mA$$

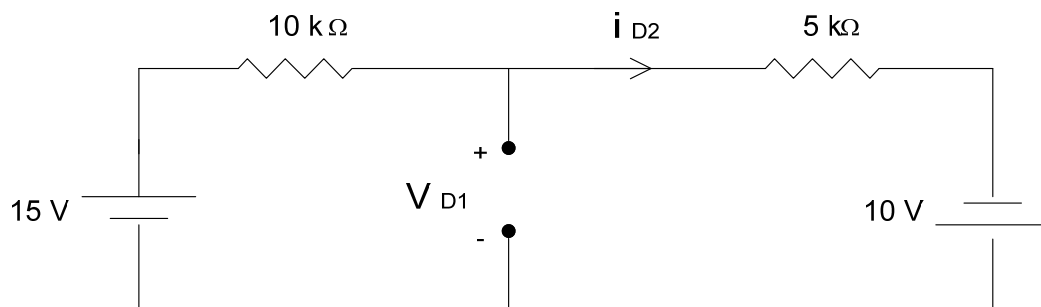
با توجه به اینکه دیود ایده آل هستند برای روشن شدن دیودها باید جریان دیودها مثبت باشند در غیر اینصورت دیود خاموش است .

$$i_{D2} = \frac{0 - (-10)}{5} = 2mA > 0$$

$$I_{D1} = I - i_{D2} = 1.5 - 2 = -0.5mA$$

D1 : OFF

D2 : ON



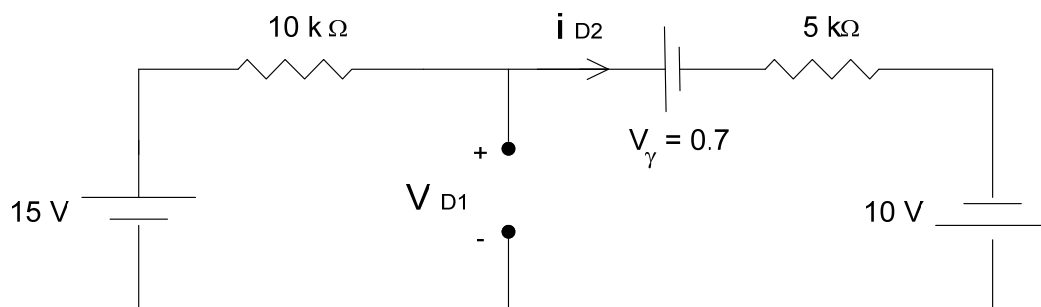
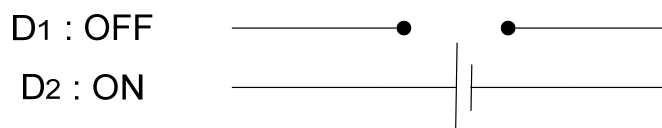
$$KV1: -15 + 10i_{D2} + 5i_{D2} - 10 = 0 \Rightarrow i_{D2} = \frac{25}{15} = \frac{5}{3} > 0$$

فرض D2: on درست است

$$KVi2: -5 + 10i_{D2} + V_{D1} = 0 \Rightarrow V_{D1} = 15 - (10 \times \frac{5}{3}) = -\frac{5}{3} < 0$$

فرض D1: off درست است

ب) می دانیم که D2: on و D1: off است



$$KV1 \text{ کلی} : -15 + 10i_{D2} + 0/7 + 5i_{D2} + 10 = 0$$

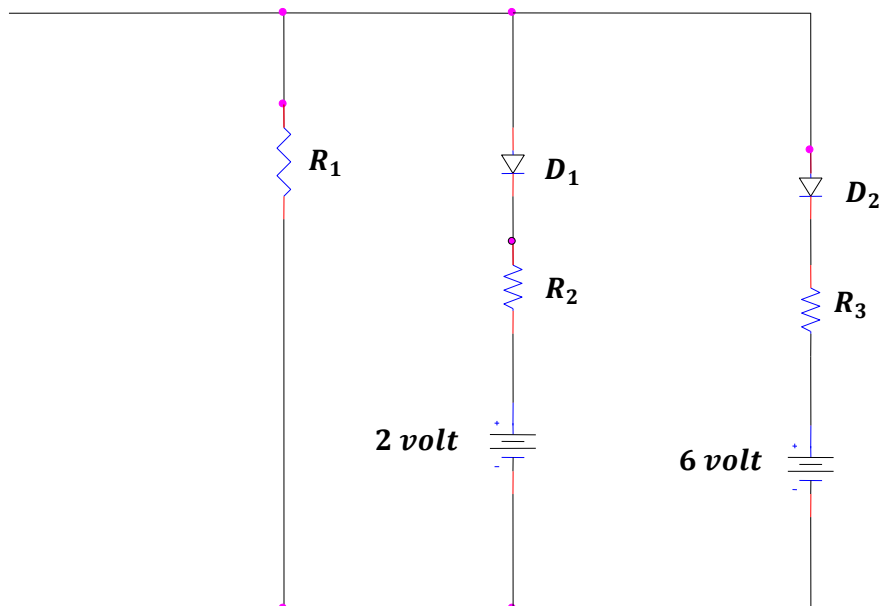
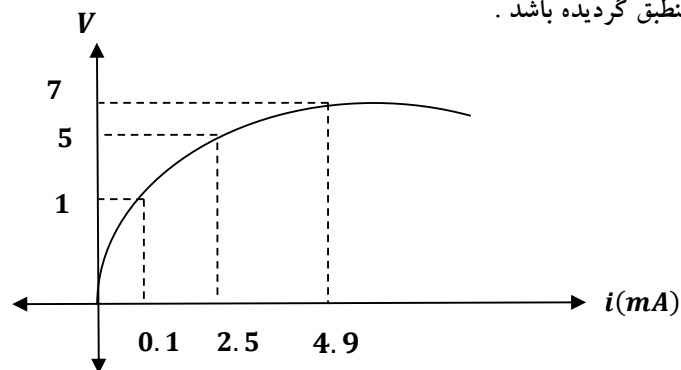
$$\Rightarrow i_{D2} = \frac{15 - 0/7 - (-10)}{10 + 5} = 1/62 \text{ mA} > 0$$

فرض $D2: \text{on}$ درست است

$$KV11: -15 - 10i_{D2} + V_{D1} = 0 \Rightarrow 15 - 10i_{D2} = V_{D1} \Rightarrow V_{D1} = 15 - 10(1/62) = -1/2 < 0/7$$

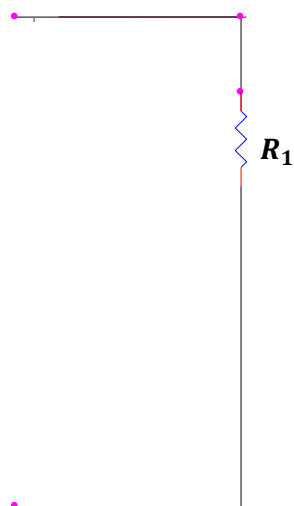
فرض $D1: \text{off}$ درست است .

مثال ۷) در مدار شکل زیر دیود ها را ایده آل را تصور کنید . مقادیر R_1, R_2, R_3 را طوری تعیین نمایید که مدار در تقریب خطی سه قسمی برای مشخصه $i = 0.1 \text{ v}^2$ و در مقادیر $v = 1, 5, 7 \text{ volt}$ منطبق گردیده باشد .



حل : در حل این مثال ۳ قسمت را به صورتی که در زیر مشاهده می کنید در نظر خواهیم داشت :

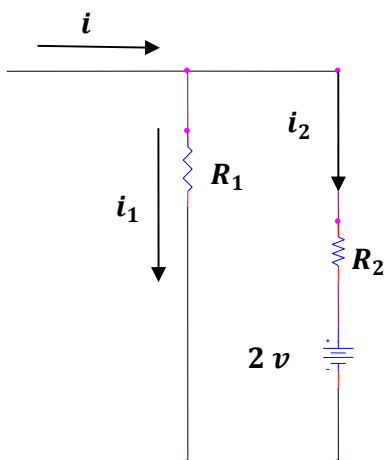
حالت اول : $v_i < 2$



$$v_i < 2 \Rightarrow \begin{cases} D_1 : Off \\ D_2 : Off \end{cases} \Rightarrow i = \frac{v_i}{R_1} \Rightarrow R_1 = \frac{1}{0.1} = 10 \text{ K}$$

$$V_i = 1 \Rightarrow i = 0.1 v^2 \Rightarrow i_i = 0.1$$

حالت دوم : $2 < v_i < 6$

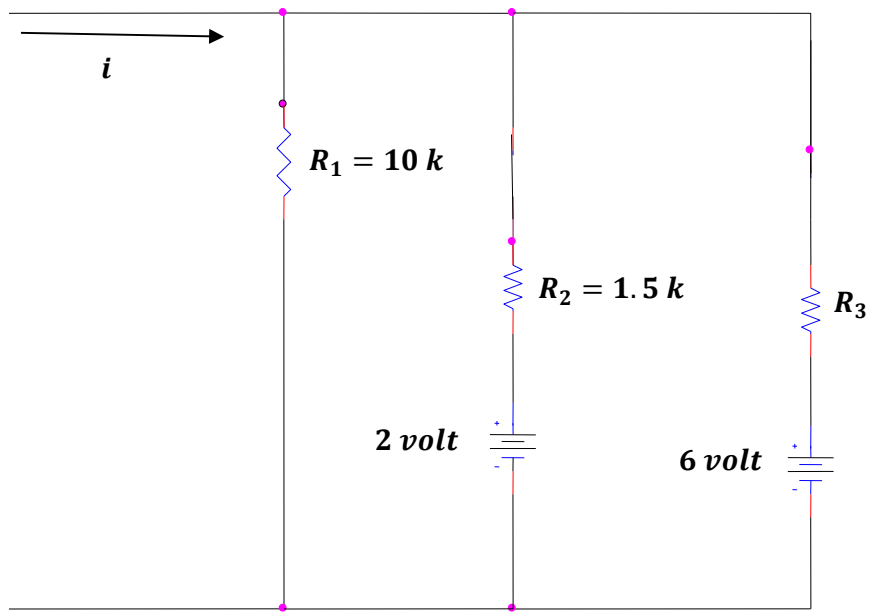


$$2 < v_i < 6 \Rightarrow \begin{cases} D_1 : on \\ D_2 : Off \end{cases} \Rightarrow i = \frac{v_i}{10} + \frac{v_i - 2}{R_2} \Rightarrow$$

$$i = 0.1(0.5)^2 = 2.5 \Rightarrow 2.5 = \frac{v_i}{10} + \frac{v_i - 2}{R_2} \Rightarrow v_i = 5$$

$$V_i = 5 \Rightarrow 2.5 = \frac{5}{10} + \frac{5 - 2}{R_2} \Rightarrow R_2 = 1.5 \text{ K}$$

حالت سوم : $v_i > 6$



$$v_i > 6 \Rightarrow \begin{cases} D_1 : on \\ D_2 : on \end{cases} \Rightarrow i = \frac{v_i}{R_1} + \frac{v_i - 2}{R_2} + \frac{v_i - 6}{R_3} \Rightarrow i = \frac{v_i}{10} + \frac{v_i - 2}{1.5} + \frac{v_i - 6}{R_3}$$

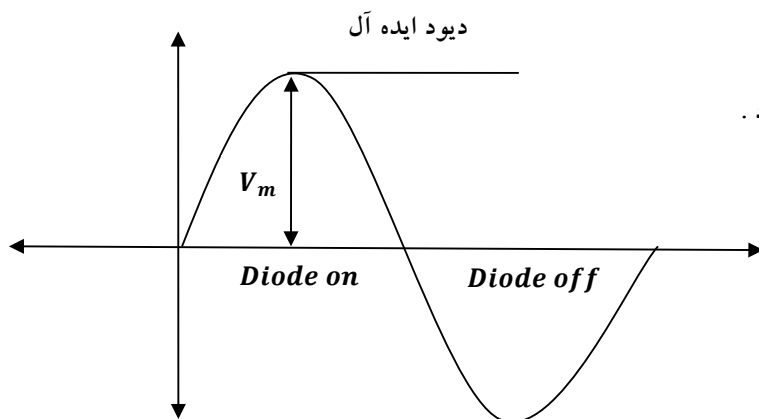
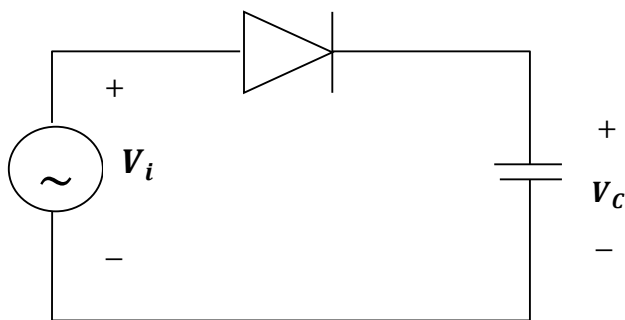
$$i = 4.9 \quad \& \quad V_i = 7 \Rightarrow 4.9 = \frac{7}{10} + \frac{7 - 2}{1.5} + \frac{7 - 6}{R_3} \Rightarrow R_3 = 1.15 K$$

➤ فصل سوم : قسمت دوم (کاربرد های دیود در معادلات الکتریکی)

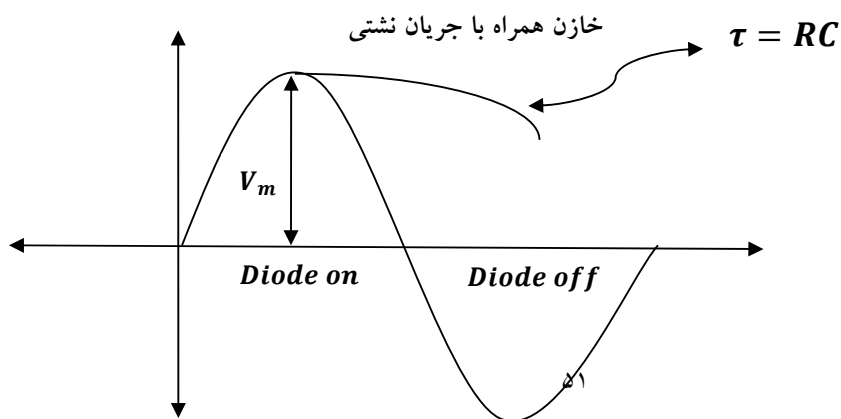
۱) ماکزیمم سنج *Peak sampler*

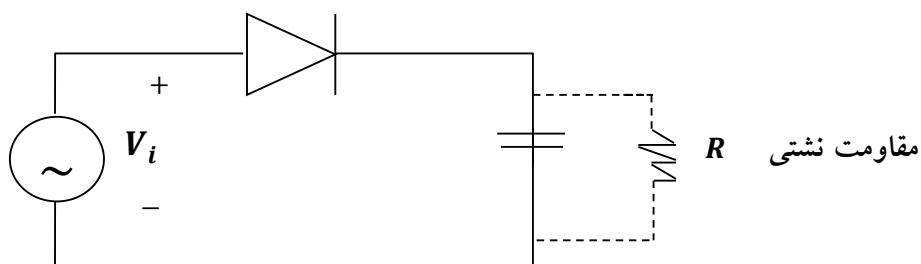
حالت ایده آل :

وقتی گفته می شود که خازن جریان نشتی دارد (دشارژ می شود) مانند این حالت است که با مقاومت درونی موازی باشد. (حالت غیر ایده آل)



خازن تعداد V_m پر کرده و نگاه می دارد .





نکته : دیود روشن می شود و خازن تا V_m شارژ می شود . در حالت غیر ایده آل مقدار V_m کاسته می شود .

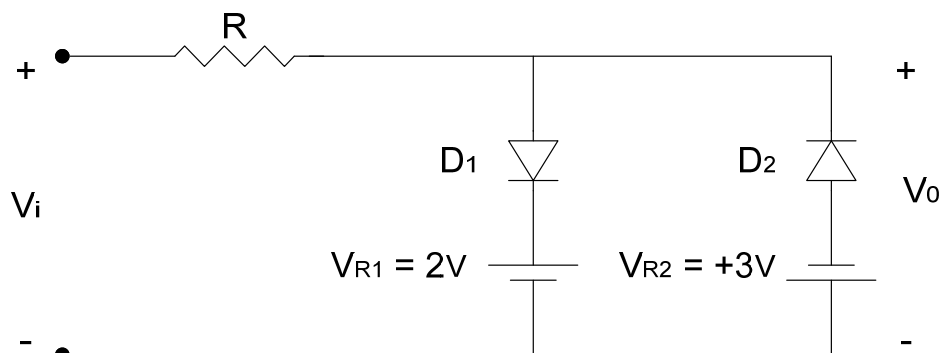
۲) مدار برش یا محدود کننده : *limitter or clip*

هدف از این مدار انتخاب بخشی از سیگنال ورودی که بالاتر یا پایین تر از یک حد معین (ولتاژ مرجع) می باشد .

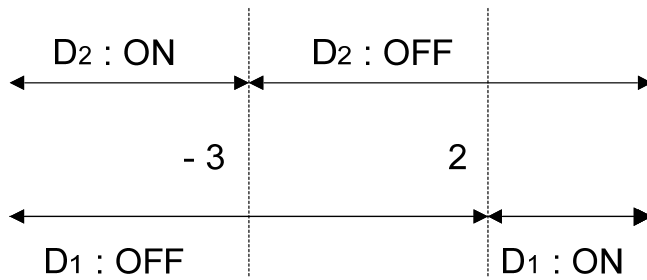
نکته ۱ : شکل موج خروجی این مدارها همیشه پیوسته است .

نکته ۲ : اغلب موارد تعداد نقاط شکست در مشخصه انتقالی مساوی تعداد دیود ها در مدار می باشد .

مثال ۳ : مشخصه انتقالی مدار زیر را ترسیم نمایید .

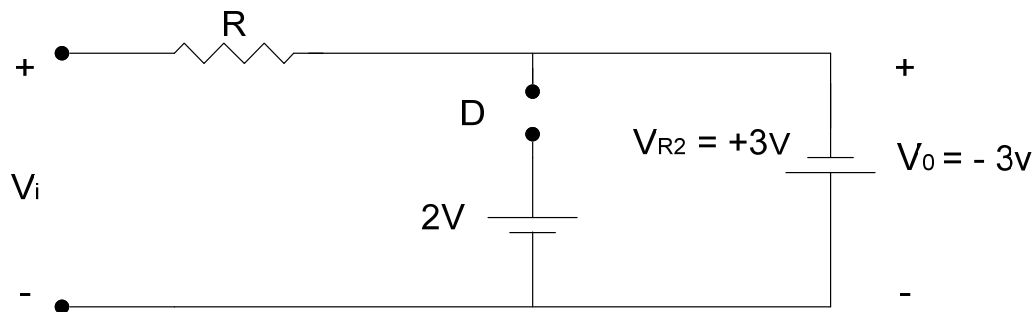


حل :

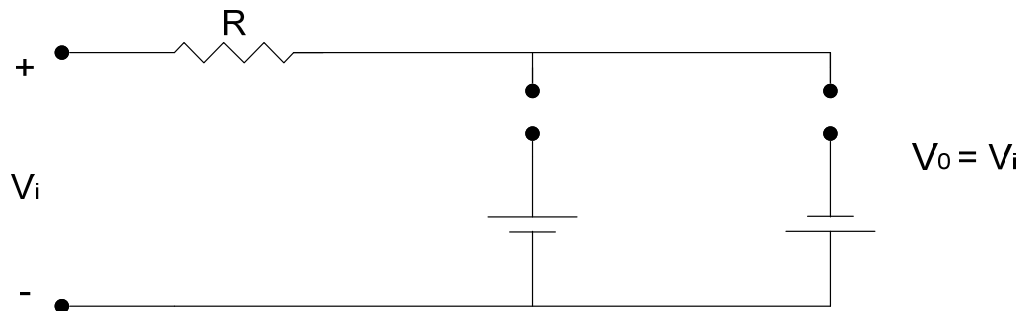


حالت اول : $V_i < V_{R2} = -3 \implies D_1 : \text{off} , D_2 : \text{on}$

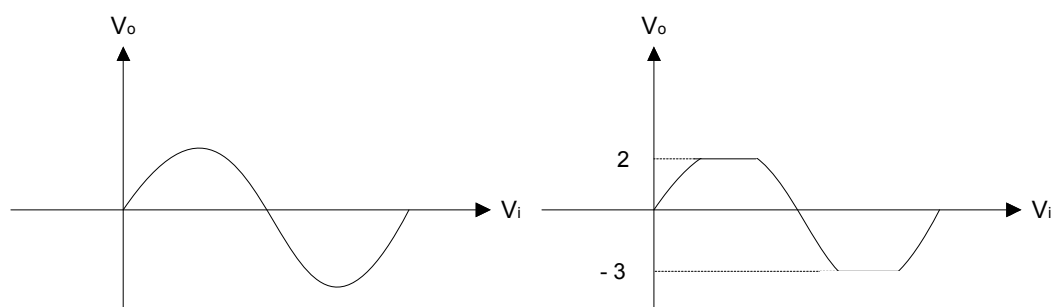
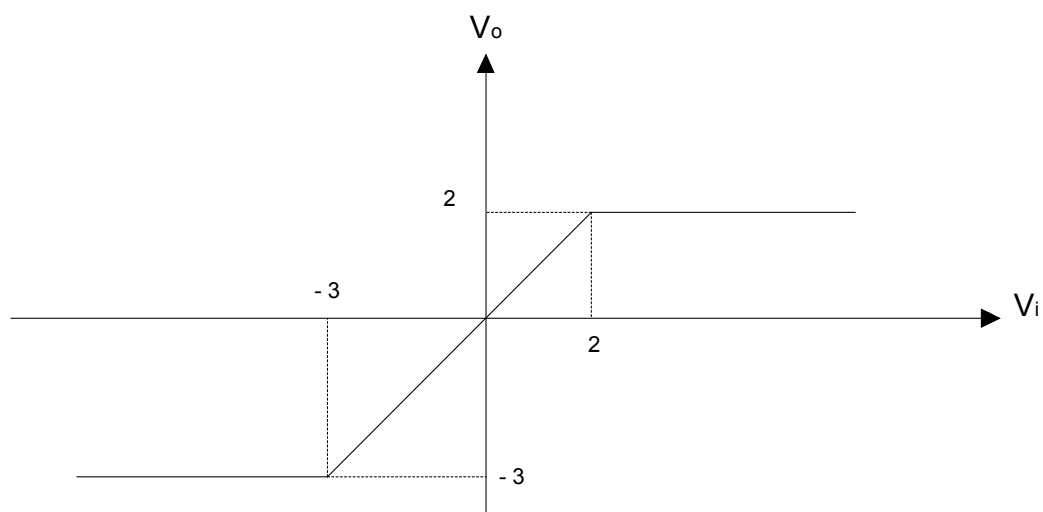
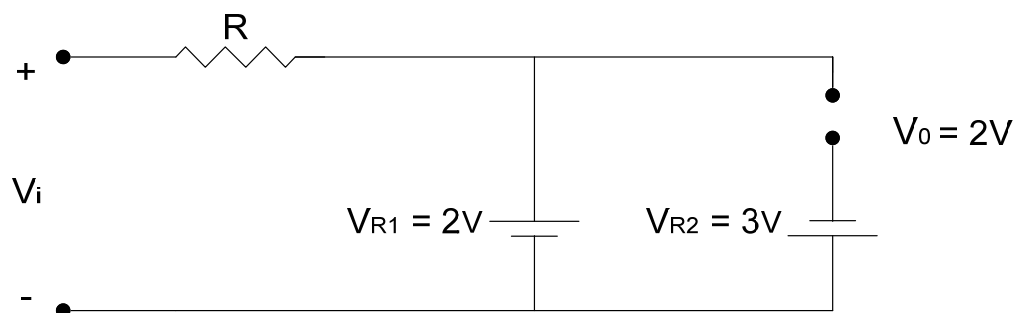
$$V_o = V_{R2} = -3$$



حالت دوم : $-3 < V_o < 2 \implies V_o = V_i$

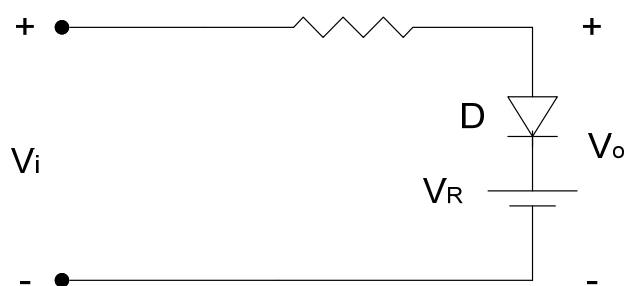


حالت سوم : $2 < V_i \implies V_o = V_{R2} = 2\text{V}$



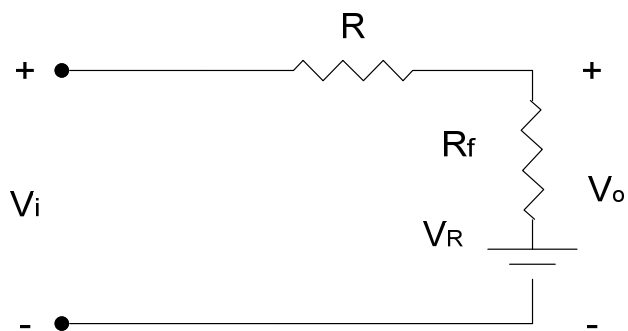
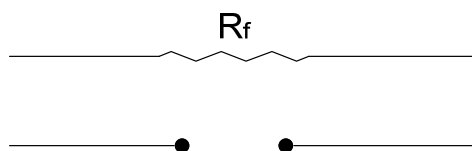
مثال ۴: مشخصه انتقالی مدار برش با دیود های غیر ایده آل زیر را بنویسید

الف) دیود را دارای R_f در نظر بگیرید. ب) دیود دارای R_f و V_0 در نظر بگیرید. در این حالت مشخصه انتقالی را به ازای ورودی مثلثی ترسیم نمایید.



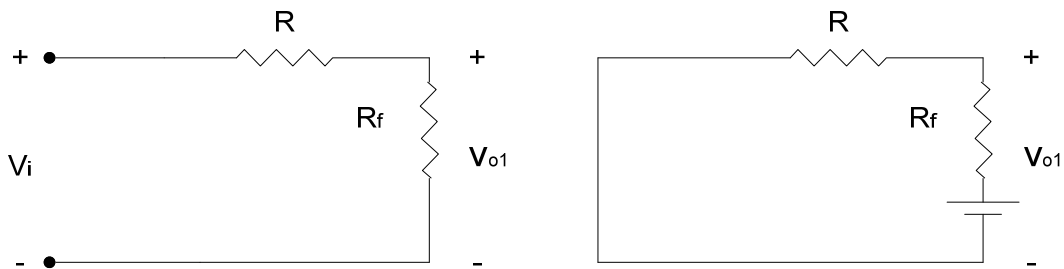
حل:

$$R_f \neq 0 \Rightarrow D: \begin{cases} D: on \Rightarrow \\ D: off \Rightarrow \end{cases}$$



$$i_f : V_1 > V_R \Rightarrow D : on$$

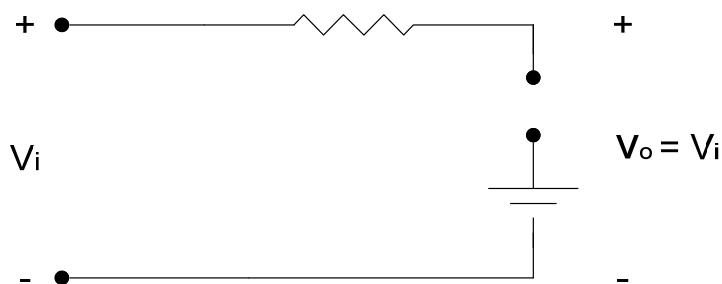
برای یافتن v_0 با توجه به مدار های زیر از قانون جمع آثار به همراه قاعده تقسیم ولتاژ استفاده می کنیم.



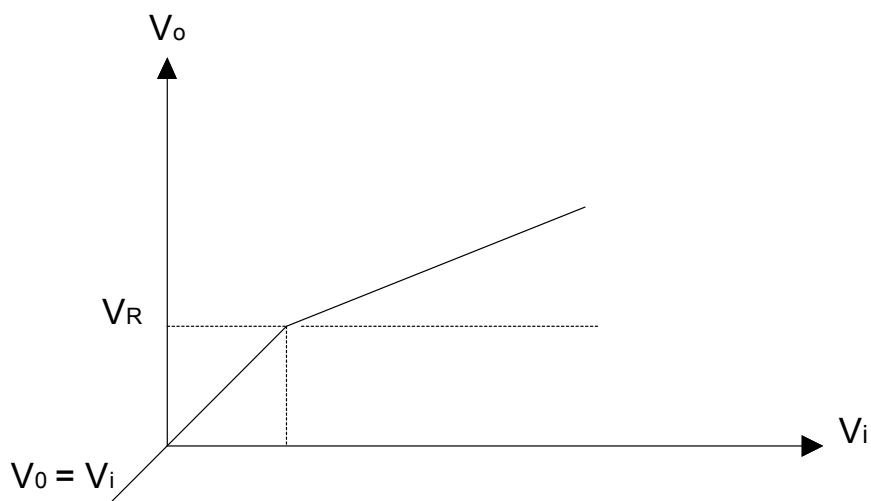
$$V_{o1} = V_i \times \frac{R_f}{R_f + R}$$

$$V_{o2} = V_R \times \frac{R}{R + R}$$

$$\text{قانون جمع آثار} \Rightarrow V_o = V_{o1} + V_{o2} \Rightarrow V_o = \left(V_i \times \frac{R_f}{R_f + R} \right) + \left(V_R \times \frac{R}{R + R_f} \right)$$

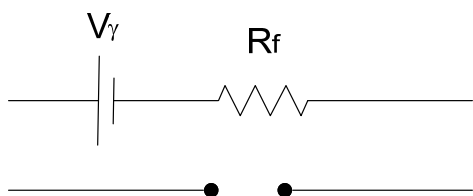


$$i_f : V_i < V_R \Rightarrow D : off \Rightarrow V_o = V_i$$

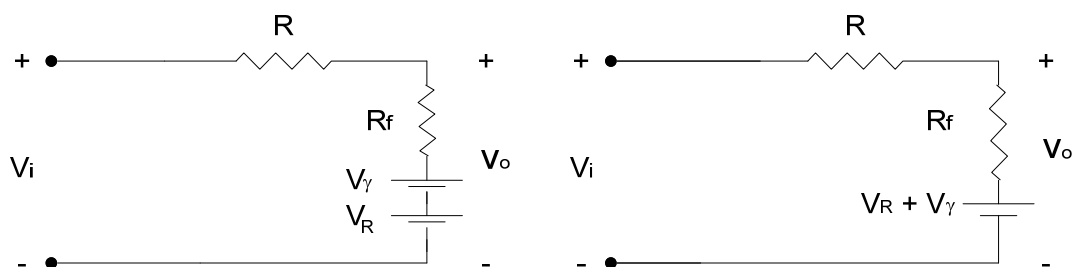


ب) $R_f \neq 0, V_\gamma \Rightarrow D: \begin{cases} D: on \Rightarrow \\ D: off \Rightarrow \end{cases}$

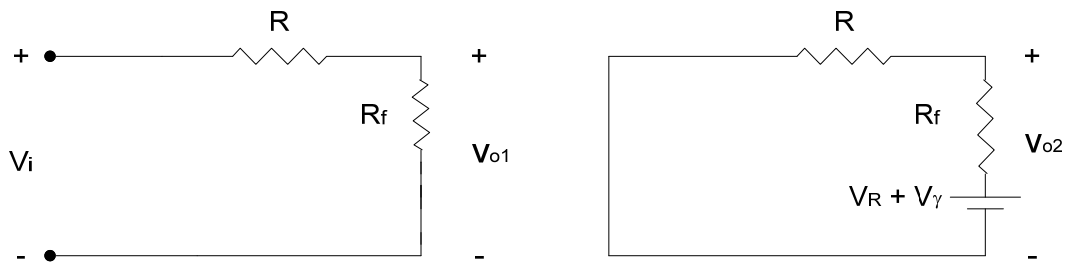
D: $D: on \Rightarrow V_A - V_K > 0$
 $D: off \Rightarrow V_A - V_K < V_\gamma$



$i_f: V_i > V_R \Rightarrow D: on$



برای یافتن V_0 با توجه به مدارهای زیر از قانون جمع آثار و قانده تقسیم ولتاژ استفاده می کنیم .

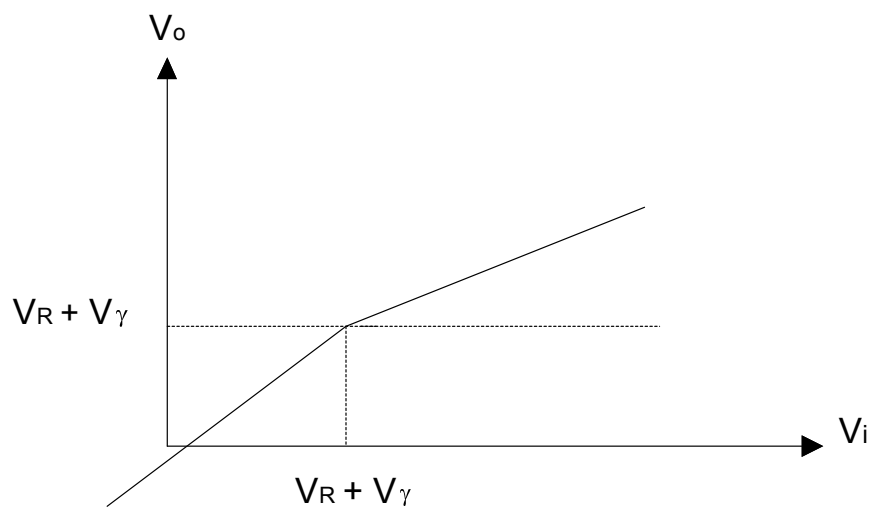
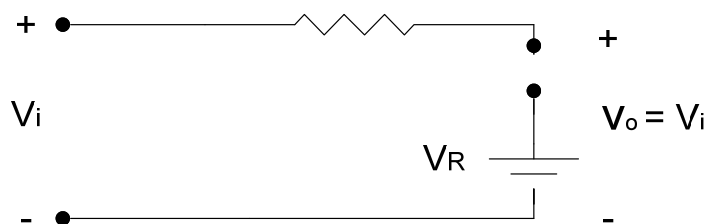


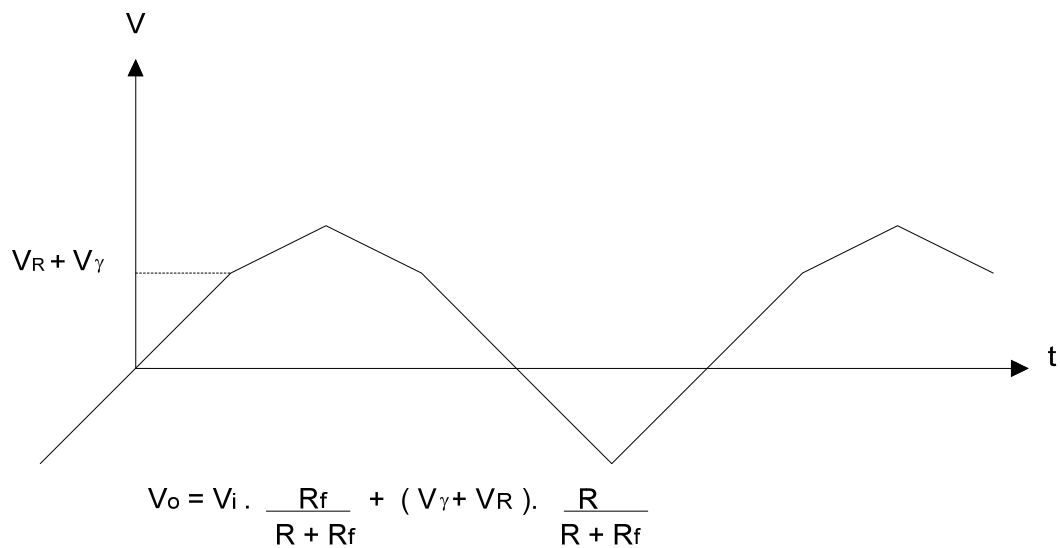
$$V_{o1} = V_i \times \frac{R_f}{R_f + R}$$

$$V_{o2} = (V_R + V_\gamma) \times \frac{R}{R + R_f}$$

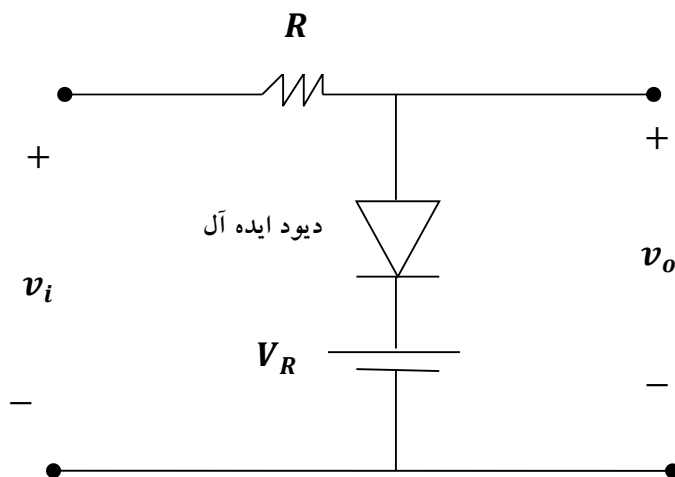
$$\Rightarrow V_o = V_{o1} + V_{o2} = \left(V_i \times \frac{R_f}{R_f + R} \right) + \left((V_R + V_\gamma) \times \frac{R}{R + R_f} \right)$$

if : $V_i < V_R + V_\gamma \Rightarrow D : \text{off}$



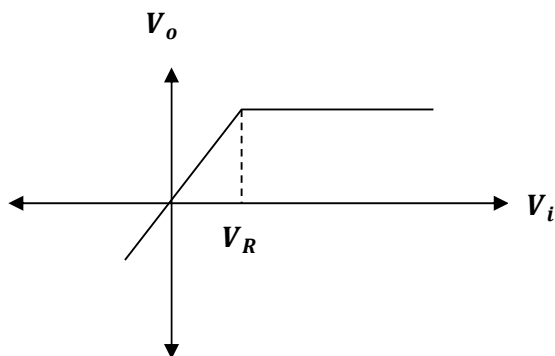


مثال ۱) به شکل و روابط آمده در زیر توجه کنید :



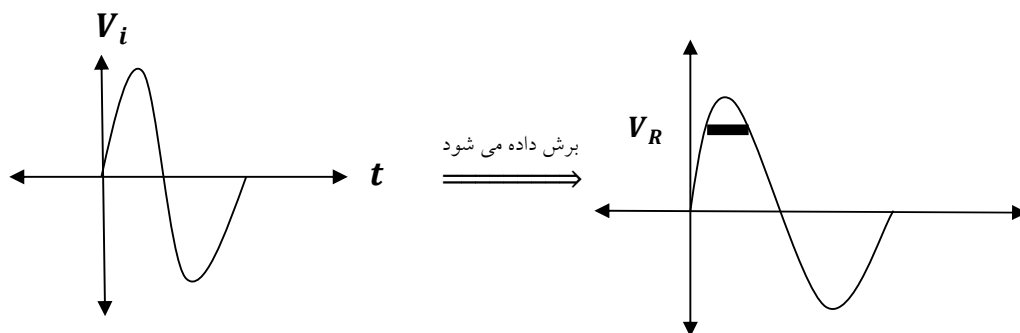
$$V_i < V_R \Rightarrow \text{Diode : Off} \Rightarrow \text{open circuit} \Rightarrow i = 0 \Rightarrow V_o = V_i$$

$$V_i > V_R \Rightarrow \text{Diode : On} \Rightarrow \text{short circuit} \Rightarrow V_o = V_R$$



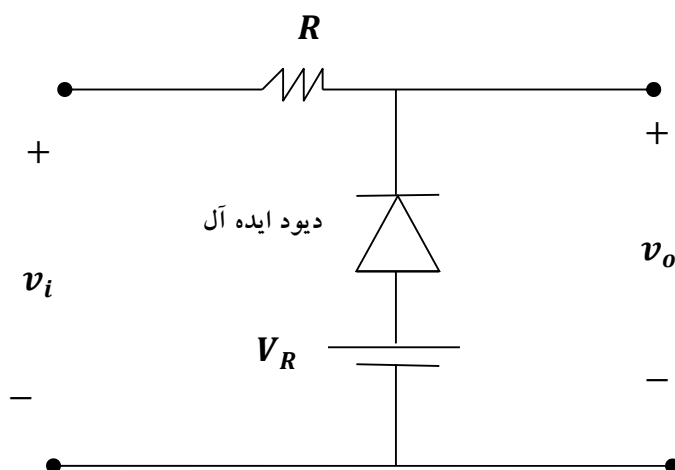
به نمودار روبرو مشخصه انتقالی گفته می شود .

در واقع مشخصه ای که به کمک آن می توان ورودی را برش دهیم . و این مشخصه با توجه به مدار حاصل می شود . به نمودار برش زیر توجه کنید :



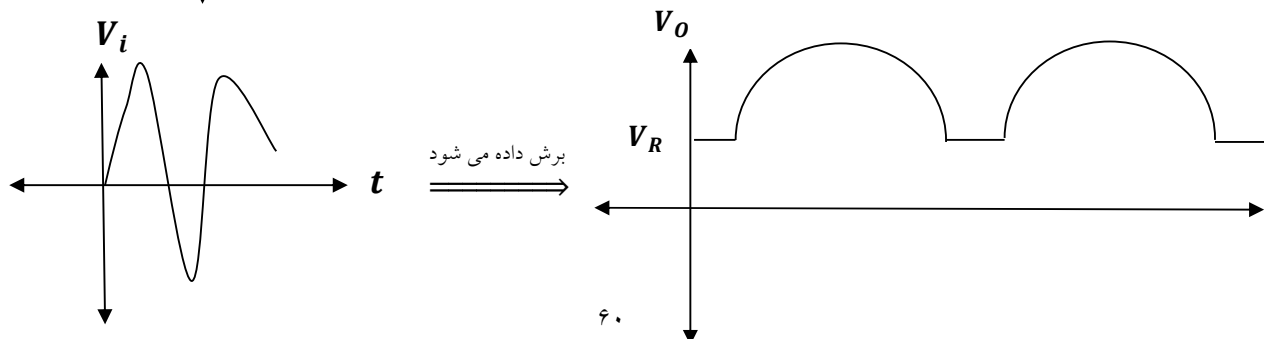
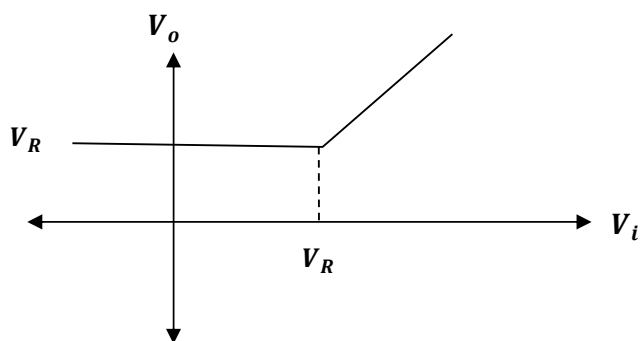
در مثال فوق تصور شده است که ورودی به صورت تابعی سینوسی می باشد که به فرمت نشان داده شده به کمک معادله مشخصه انتقالی حاصل از مدار، ورودی برش داده می شود.

مثال ۲) در مدار زیر با توجه به اینکه دیود ها ایده آل می باشند. خروجی را رسم کنید ؟ (مشخصه انتقالی را ترسیم نمایید ؟)



$$V_i < V_R \Rightarrow \text{Diode : On} \Rightarrow V_o = V_R$$

$$V_i > V_R \Rightarrow \text{Diode : OFF} \Rightarrow \text{Open circuit} \Rightarrow i = 0 \Rightarrow V_o = V_i$$



تمرین : در مثال قبل (مثال شماره ۲) مشخصه انتقالی را برای دیود غیر ایده آل :

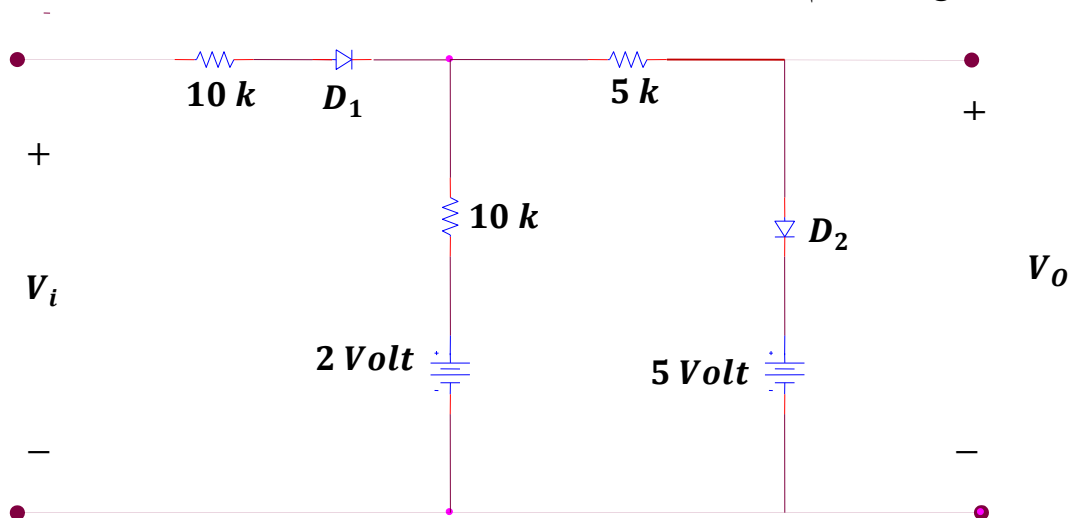
الف) با تقریب منبع مقاومت V_T

ب) با تقریب منبع مقاومت V_T به همراه مقاومت R_f رسم کنید .

ج) خروجی الف و ب را برای شکل موج مثلثی ترسیم نمایید ؟

مثال ۳) مشخصه انتقالی را در مدار زیر رسم کنید ؟ (دیود ها را ایده آل تصور کنید .)

ب) خروجی را برای شکل موج مثلثی ترسیم نمایید ؟

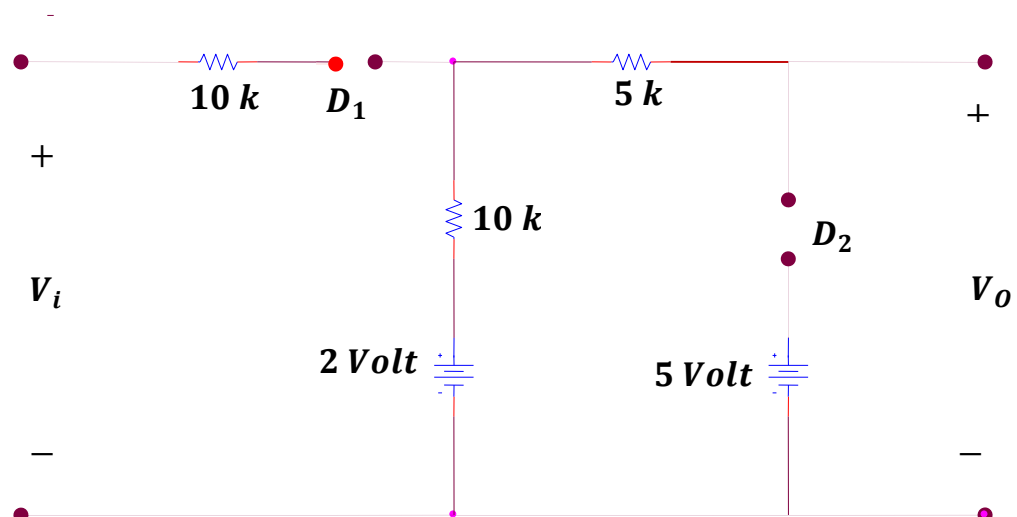


حل : حالت اول :

for $V_i < 2 \text{ Volt} \Rightarrow D_1: \text{off} \text{ And } D_2: \text{Off}$

$V_o = 2 \text{ volt}$ افت ولتاژ روی مقاومت ۵ و ۱۰ کیلو اهمی وجود ندارد .

به مدار حالت اول توجه کنید :

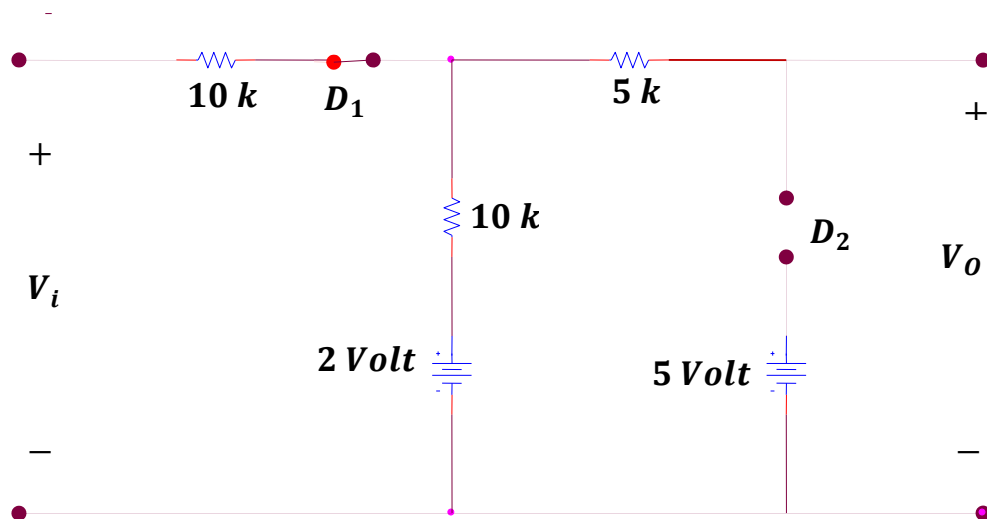


حالت دوم :

for $2 < V_i < ? \Rightarrow D_1: \text{On} \text{ And } D_2: \text{Off}$

$$V_o = V_i \times \frac{10}{10+10} + 2 \times \frac{10}{10+10} = \frac{V_i}{2} + 2 \Rightarrow V_o = 5 \Rightarrow V_i = 8 \text{ Volt}$$

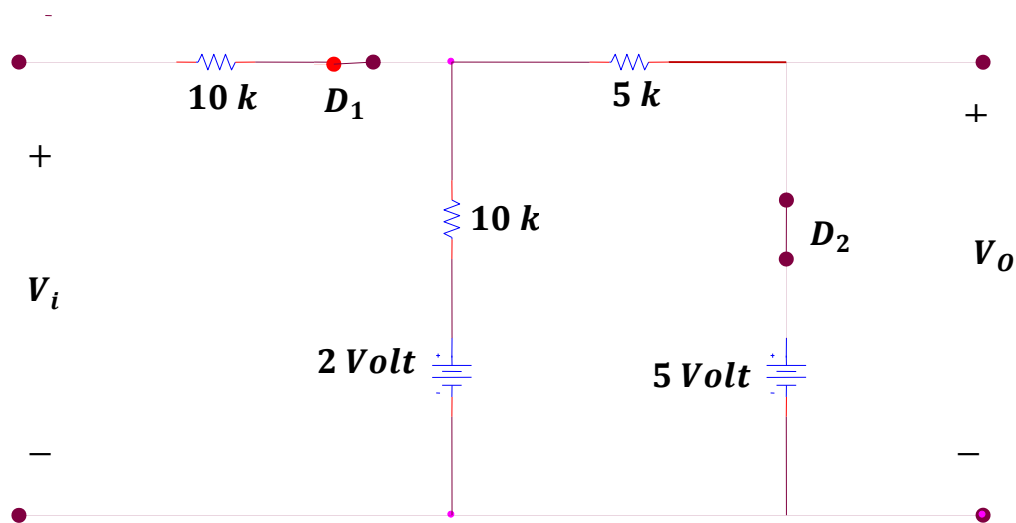
به مدار حالت دوم توجه کنید :



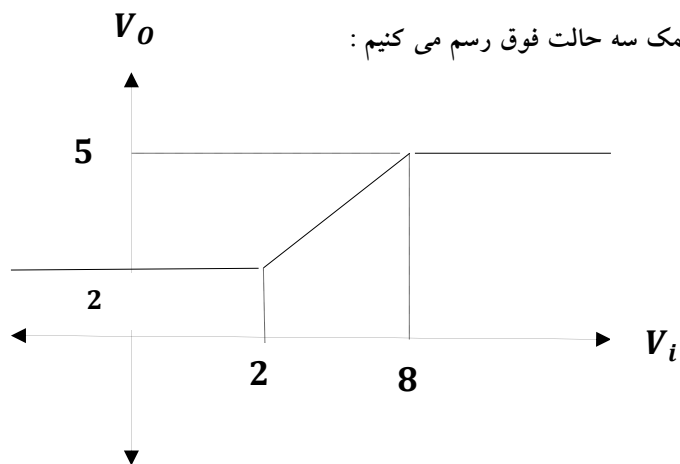
حالت سوم :

$$\text{for } V_i > 8 \text{ Volt} \Rightarrow D_1: \text{On} \text{ And } D_2: \text{On} \Rightarrow v_o = 5 \text{ Volt}$$

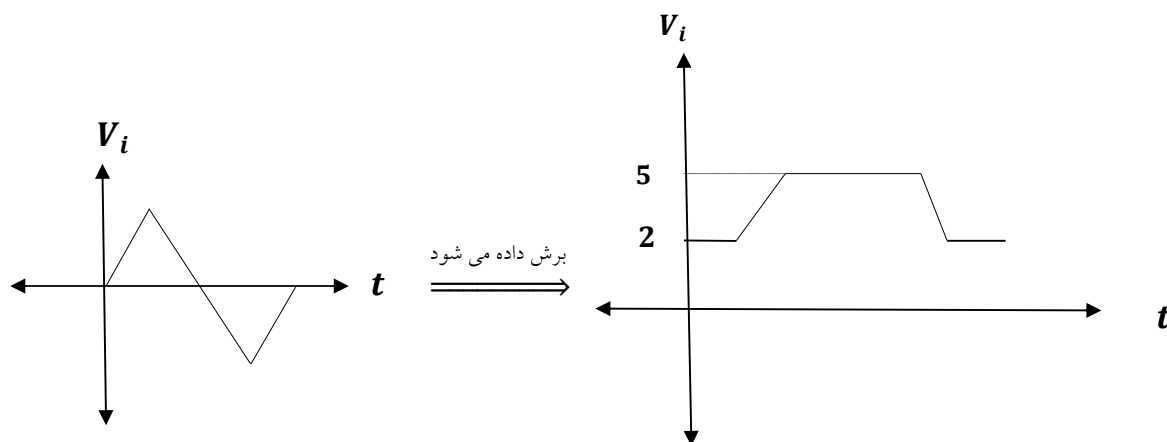
به مدار حالت سوم توجه کنید :



برای پاسخ به قسمت الف سوال معادله مشخصه را به کمک سه حالت فوق رسم می کنیم :

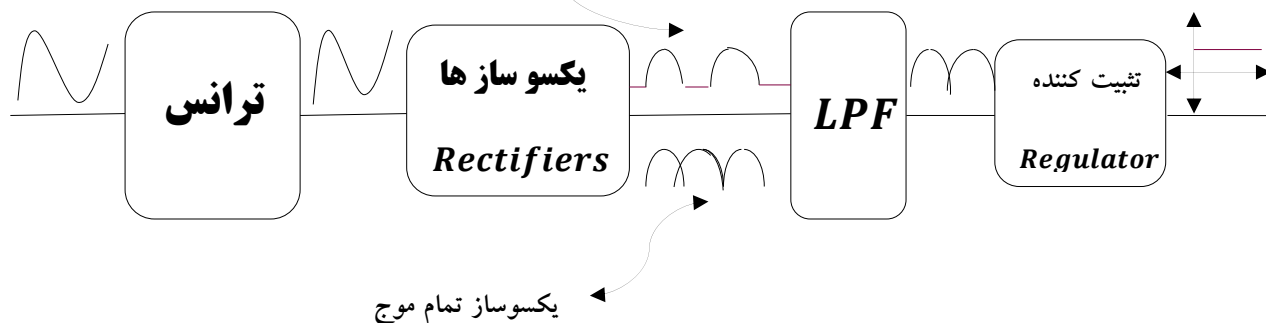


ب) در این قسمت با توجه به اینکه تصور شده است ورودی به صورت مثلی و به صورت زیر می باشد به کمک معادله مشخصه حاصله از مدار آن را به صورت نشان داده شده در زیر برش می زنیم .



✓ معرفی یکسوسازها (Rectifiers)

به دیاگرام زیر در رابطه به معرفی یکسوسازها توجه کنید :

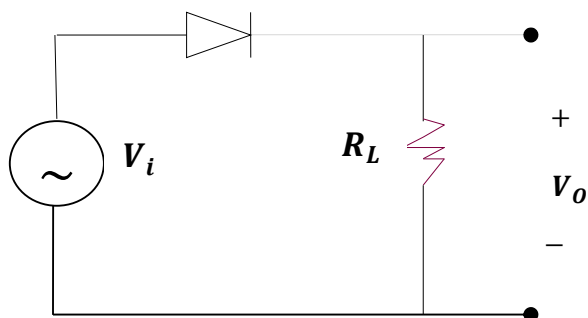


یکسوسازها به دو نوع زیر تقسیم بندی می شوند :

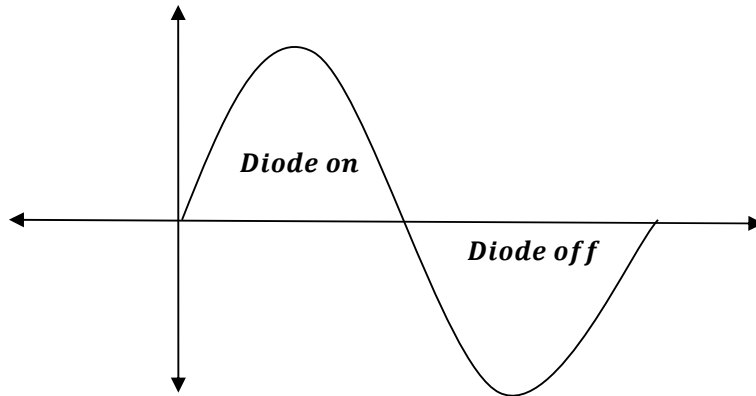
(۱) یکسوساز نیم موج *Half Wave*

(۲) یکسوساز تمام موج *Full Wave*

معرفی یکسوساز نیم موج :



به منحنی روبرو توجه کنید :



$$\left\{ \begin{array}{l} V_i > 0 \Rightarrow D : on \Rightarrow V_o = V_i \Rightarrow i = \frac{V_i}{R + R_f} \Rightarrow i(t) = \frac{V_{im}}{R + R_f} \sin \omega t \\ V_i < 0 \Rightarrow D : off \Rightarrow V_o = 0 \end{array} \right.$$

$$V_{idc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{im} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{V_{im}}{2\pi} [-\cos \omega t] (0 : 2\pi) \Rightarrow$$

$$V_{idc} = \frac{V_{im}}{2\pi} [1 - 1] = 0$$

$$I_{idc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{V_{im}}{R_L + R_f} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{-V_m}{2\pi(R_L + R_f)} [-\cos \omega t] (0 : \pi) \Rightarrow$$

$$I_{idc} = \frac{V_m}{\pi(R_L + R_f)}$$

$$(V_o)_{dc} = R I_{dc} = \frac{RV_m}{\pi(R_L + R_f)}$$

✓ محاسبه مقادیر موثر جریان ها و ولتاژ ها :

$$I_{rms} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow I_{rms}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2(t) dt \Rightarrow$$

$$I_{rms}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{V_{im}}{R_L + R_f} \sin(\omega t) \right)^2 d(\omega t) \Rightarrow$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m^2 \cdot \sin^2(\omega t) d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m^2 \cdot \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) d(\omega t) =$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left[\frac{I_m^2}{2} \right] d(\omega t) - \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left[\frac{I_m^2}{2} \right] \cdot (\cos 2\omega t) d(\omega t) = \frac{I_m^2}{4\pi} \times \pi = \frac{I_m^2}{4}$$

$$\Rightarrow I_{rms} = \frac{I_m}{2} \quad \& \quad V_{rms} = R \cdot \frac{I_m}{2} = \frac{R \cdot V_{im}}{2(R_L + R_f)}$$

✓ محاسبه راندمان یکسوسازی در یکسو کننده نیم موج :

$$\zeta = \frac{(p_{out})_{dc}}{(p_{in})_{ave}} \times 100$$

$$\begin{aligned} (p_{in})_{ave} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi [V(t) \times i(t)] \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi [V_{im} \sin(\omega t)] \times \left(\frac{V_{im}}{R_L + R_f} \sin(\omega t) \right) d(\omega t) \end{aligned}$$

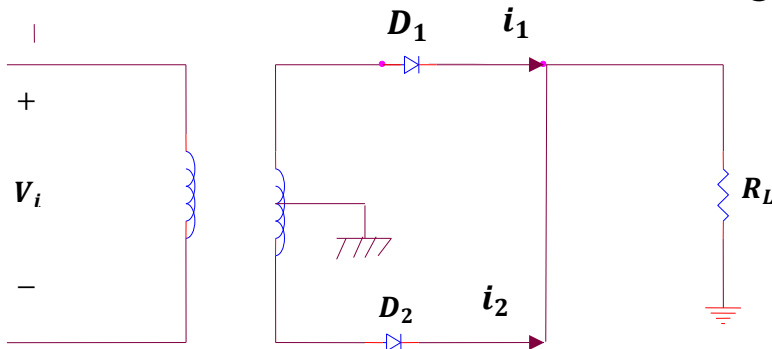
$$(p_{in})_{ave} = \frac{V_m^2}{4(R_L + R_f)}$$

$$(p_{out})_{dc} = R_L \times (I_{dc})^2 = \frac{V_m^2 \cdot R_L}{\pi^2 (R_L + R_f)^2}$$

$$\zeta = \frac{(p_{out})_{dc}}{(p_{in})_{ave}} \times 100 = \frac{\left[\frac{V_m^2 \cdot R_L}{\pi^2 (R_L + R_f)^2} \right]}{\left[\frac{V_m^2}{4(R_L + R_f)} \right]} = \frac{4R_L}{\pi^2 (R_L + R_f)} \Rightarrow$$

$$\text{if } R_f = 0 \text{ when } \Rightarrow \zeta_{Max} = \frac{4}{\pi^2} = 40.5 \%$$

✓ معرفی یکسوساز تمام موج :

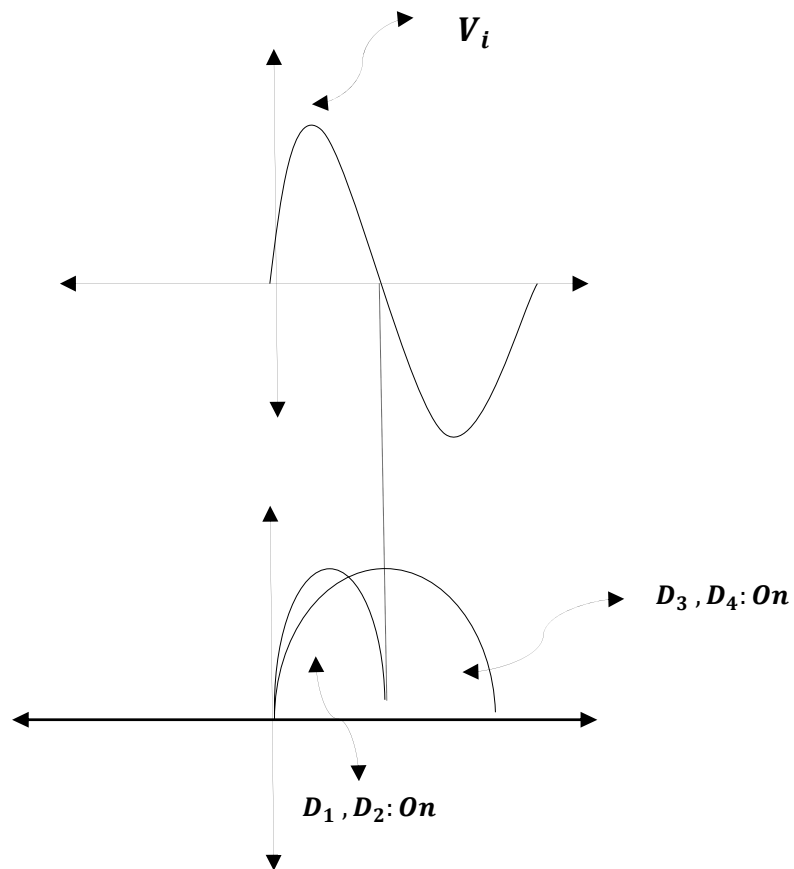


$$V_i > 0 \Rightarrow V_1 > 0, V_2 < 0 \Rightarrow D_1: on, D_2: Off$$

$$i_1 = \frac{+V_m}{R_f + R_L} \quad \& \quad i_2 = 0$$

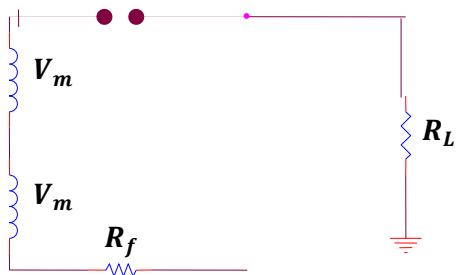
$$V_i < 0 \Rightarrow V_1 < 0, V_2 > 0 \Rightarrow D_1: off, D_2: On$$

$$i_2 = \frac{-V_m}{R_f + R_L} \quad \& \quad i_1 = 0$$



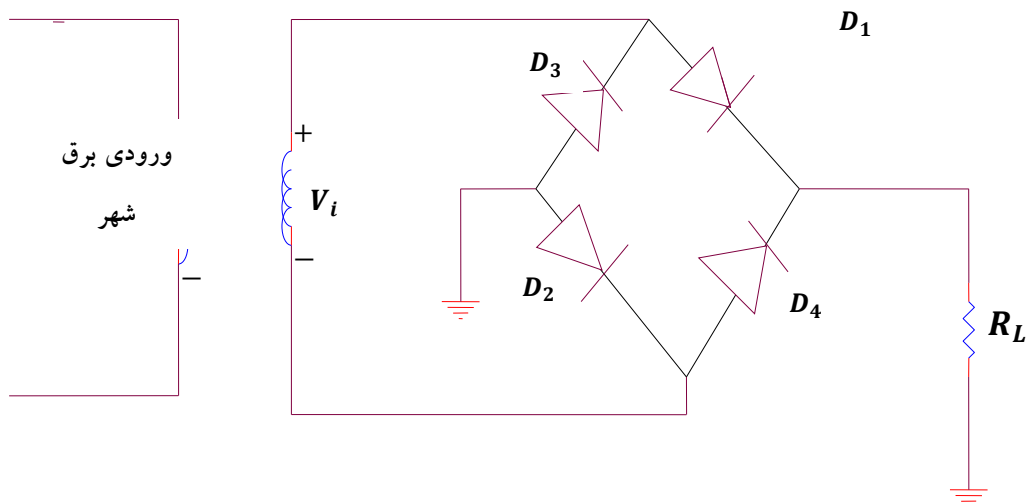
✓ معرفی **Peak Inverse Voltage : PIV**

ماکزیمم ولتاژی که دیود در بایاس معکوس تحمل می کند و نمی شکند را گویند .



$$PIV = 2V_m$$

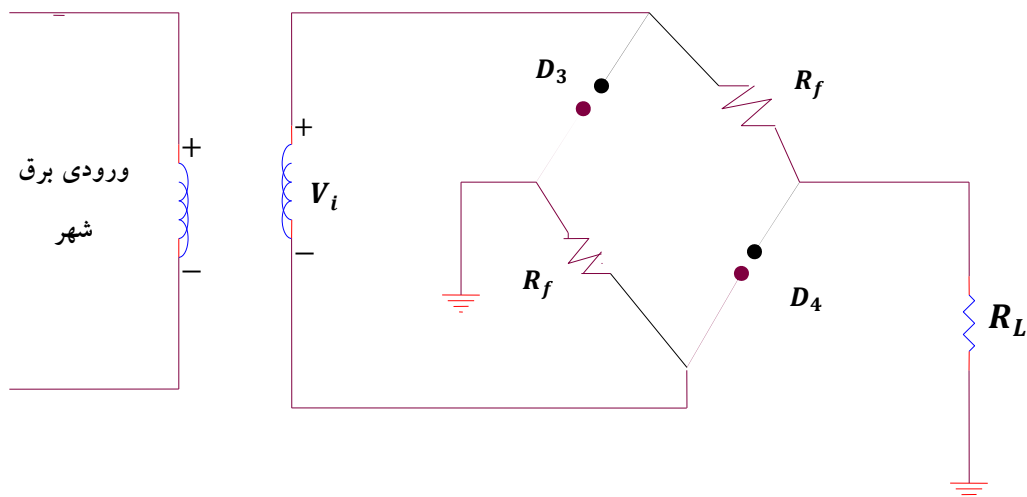
✓ معرفی یکسو ساز پل :



$$V_i = V_m \sin \omega t$$

حالت اول : $V_i > 0$

به مدار های زیر توجه کنید :

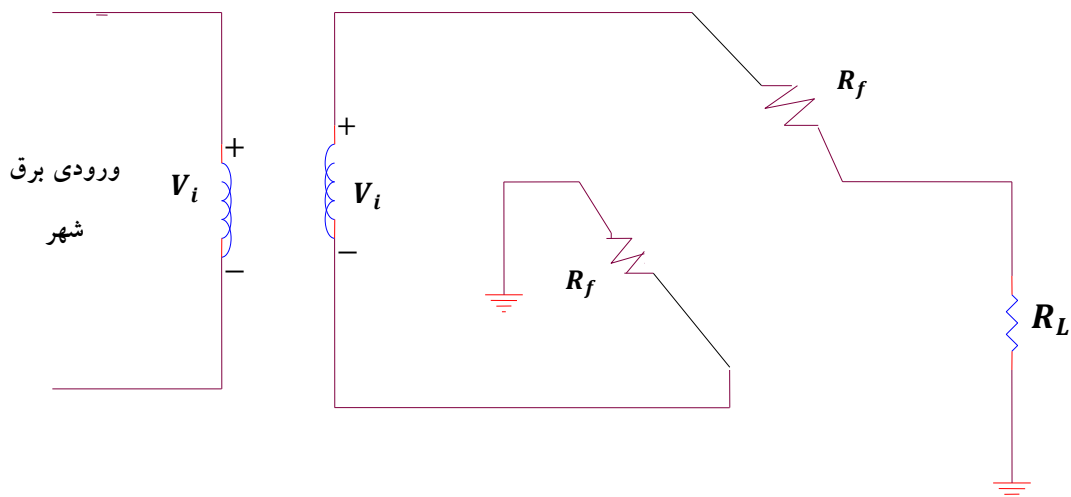


به روابط زیر که از مدار ساده شده در زیر حاصل می شود، توجه کنید :

$$V_i > 0 \Rightarrow \begin{cases} D_1 : On, D_2 = Off \\ D_3 : Off, D_4 = On \end{cases} \Rightarrow i_L(t) = \frac{V_m \sin \omega t}{R_L + 2R_f} \quad \& \quad V_o = \frac{V_i R_L}{R_L + 2R_f}$$

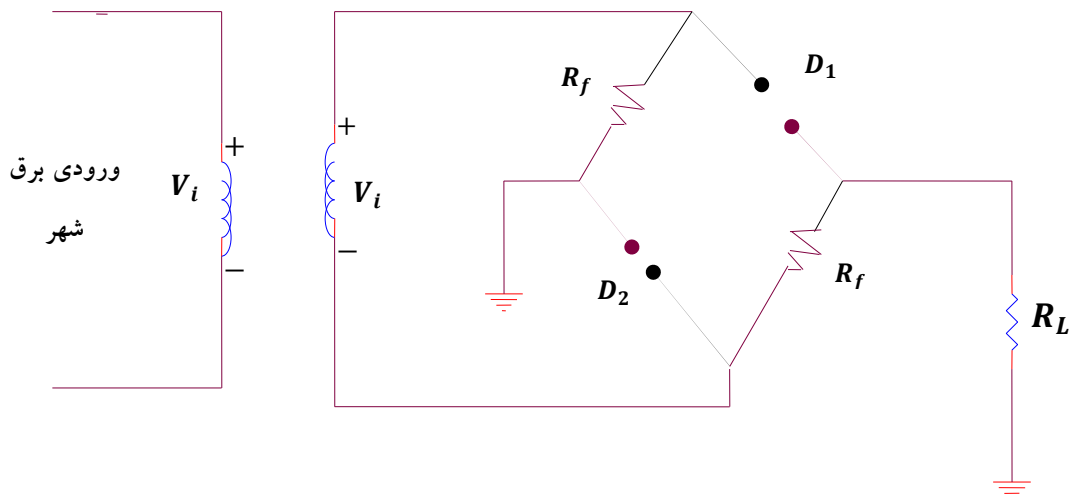
توضیح : به کمک مدار زیر، که با حذف دیود های شماره ۳ و ۴ به صورت زیر

حاصل می شود . روابط فوق استنباط می شوند .



حالت دوم : $V_i < 0$

به مدار های زیر توجه کنید :



به روابط زیر که از مدار ساده شده در زیر حاصل می شود، توجه کنید :

$$V_i < 0 \Rightarrow \begin{cases} D_3 : On, D_4 = Off \\ D_1 : Off, D_2 = On \end{cases} \Rightarrow i_L(t) = \frac{-V_m \sin \omega t}{R_L + 2R_f} \quad \& \quad V_o = \frac{-V_i R_L}{R_L + 2R_f}$$

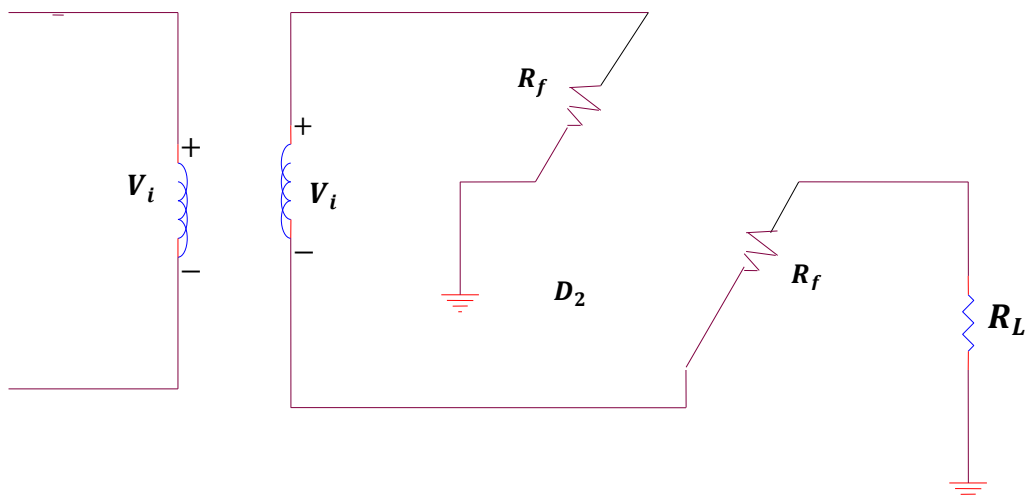
توضیح : به کمک مدار زیر، که با حذف دیود های شماره ۳ و ۴ به صورت زیر حاصل می شود . روابط فوق استنباط می شوند .

راندمان حداکثر در این حالت در حدود ۸۰ درصد می باشد .

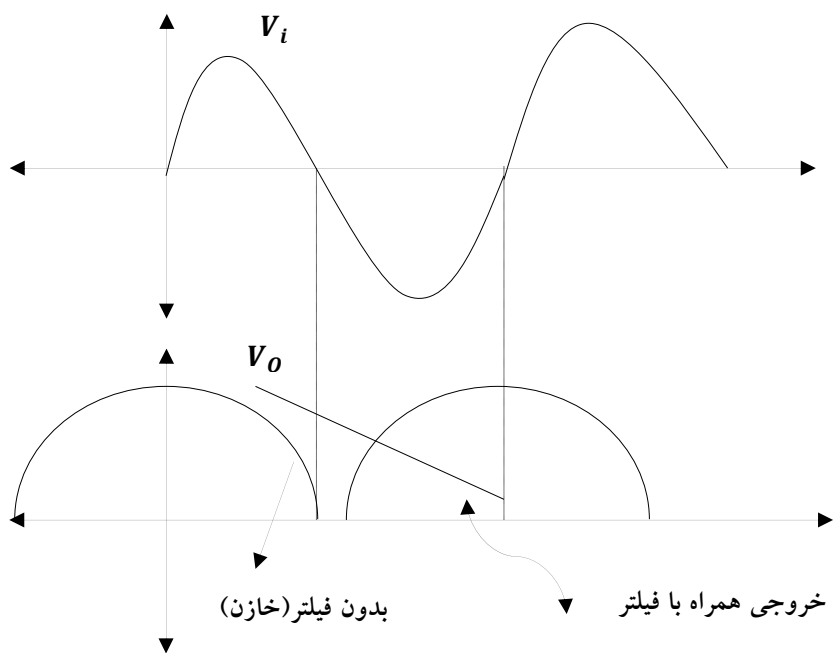
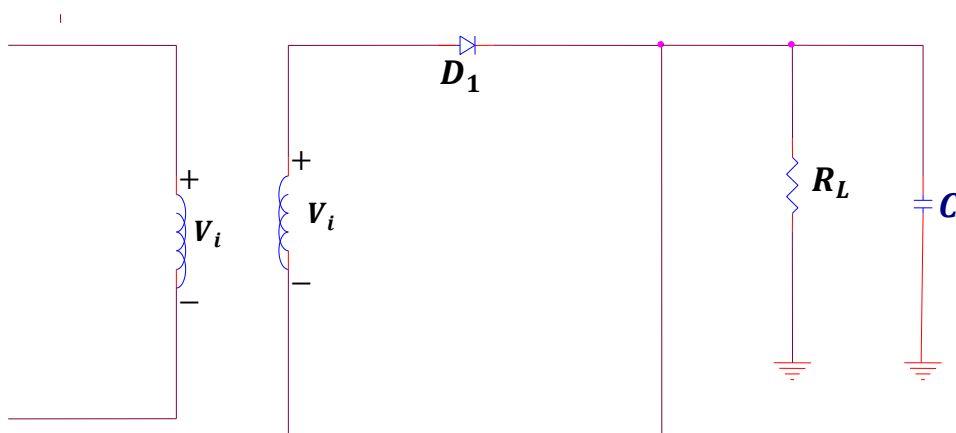
$$\zeta_{max} = 80 \%$$

و هم چنین داریم :

$$PIV = V_m$$

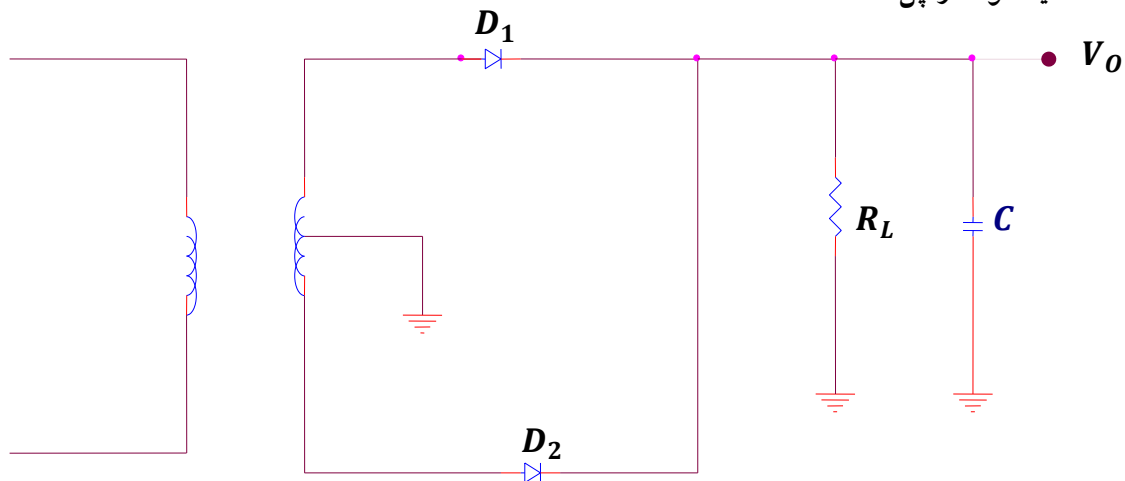


✓ استفاده از فیلتر LP (RC) در خروجی یکسو سازها :

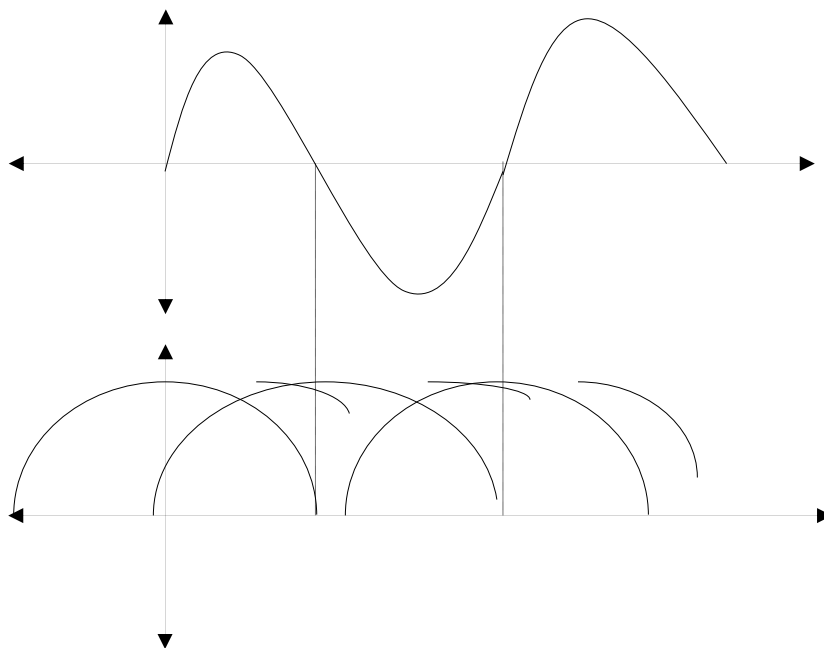


توضیح : در منحنی هایی که در بالا رسم شده اند توجه داشته باشید که :
 اگر خازن وجود داشته باشد (فیلتر وجود داشته باشد) ، اجازه نمی دهد دامنه کاهش پیدا کند
 و صفر شود ، تا حدی کاهش خواهیم داشت که به پاس بعدی برسد و دوباره افزایش پیدا
 می کند و سپس همان طیف را دنبال می کند .

✓ یکسو ساز پل :



به منحنی های زیر توجه کنید :

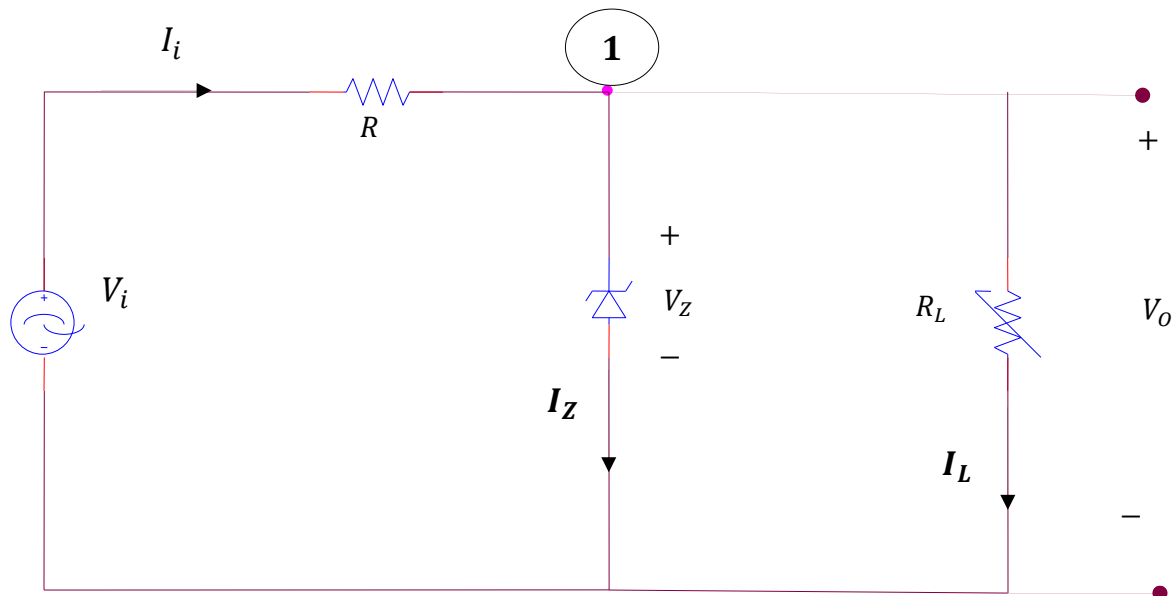


توجه : تیزی ها را در منحنی های فوق حذف کردیم .

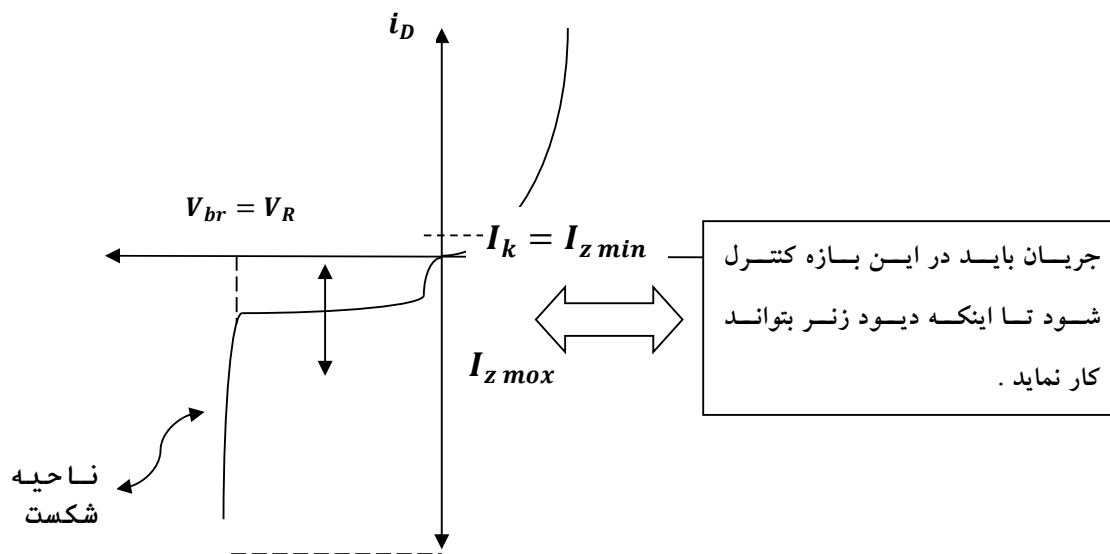
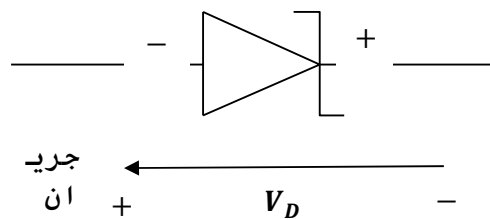
✓ معرفی دیود زنر

مدار تثبیت کننده ولتاژ با استفاده از دیود زنر :

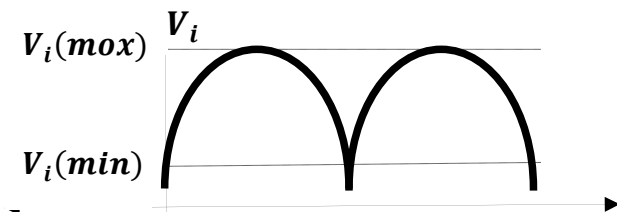
به مدار زیر توجه کنید :



برای ادامه تجزیه و تحلیل این مدار ابتدا دیود زنر را یادآوری می کنیم .:



پس از یادآوری دیود زener هم اکنون به تجزیه و تحلیل مدار می پردازیم . همانطوریکه مشاهده می شود ورودی را از یک خروجی یکسوساز گرفته ایم . می توان با توجه به منحنی آمده در زیر گفت که ورودی در یک بازه مشخصی تغییر می کند .



$$\left\{ \begin{array}{l} V_i < V_Z \\ I_K = I_{Z \min} < I_Z < I_{Z \max} \end{array} \right. \Rightarrow v_o = v_Z$$

شرایط کارکرد دیود زener :

هدف از این مدار محاسبه حداقل و حداکثر مقاومت باری است که این مدار را در حالت زنری قرار می دهد . یعنی خروجی آن ثابت می شود .

$$I_{i \min} = \frac{V_{i \min} - V_Z}{R} \quad \& \quad I_{i \max} = \frac{V_{i \max} - V_Z}{R}$$

$$kcl \text{ in } 1 : I_Z = I_i - I_L$$

حالت اول :

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

$$I_{L \max} = I_{i \min} - I_{Z \min} \Rightarrow R_{L \min} = \frac{V_Z}{I_{L \max}}$$

حالت دوم :

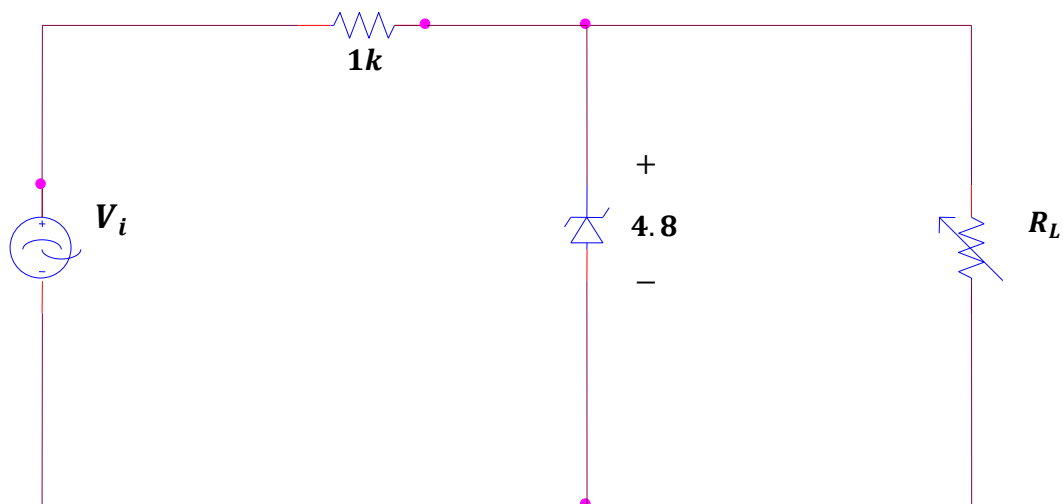
$$I_{Z \max} = I_{i \max} - I_{L \min}$$

$$I_{L \min} = I_{i \max} - I_{Z \max} \Rightarrow R_{L \max} = \frac{V_Z}{I_{L \min}}$$

مثال (در مدار شکل زیر اگر داشته باشیم :

$$V_i = 10(\text{volt}) \pm 10 \% \quad \& \quad I_K = 0.2 \text{ mA} \quad \& \quad I_{Z \max} = 7 \text{ mA} \quad \& \quad V_Z = 4.8 \text{ V} \quad \& \quad R = 1K$$

مطلوبست محاسبه $R_{L \max}$ و $R_{L \min}$ ؟



حل :

$$V_i = 10(\text{volt}) \pm 10 \% \Rightarrow 9 < V_i < 11 \Rightarrow \begin{cases} V_i(\text{min}) = 9 \\ V_i(\text{mox}) = 11 \end{cases} \Rightarrow$$

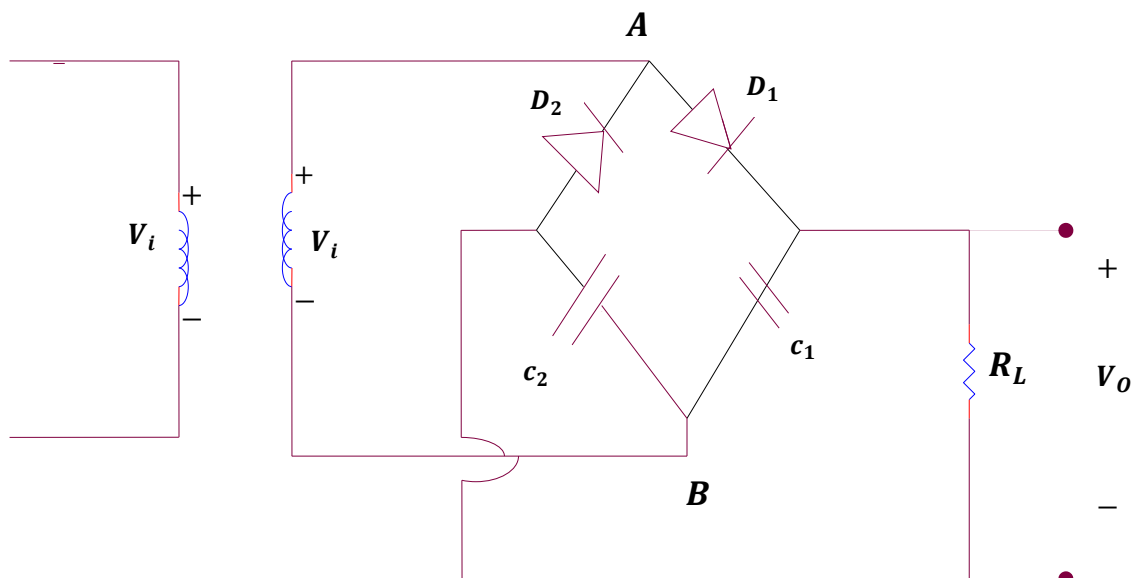
$$\left\{ \begin{array}{l} I_{i \min} = \frac{V_{i \min} - V_Z}{R} = \frac{9 - 4.8}{1} = 4.2 \text{ mA} \\ I_{L \max} = I_{i \min} - I_{Z \min} \Rightarrow I_{L \max} = 4.2 - 0.2 = 4 \text{ mA} \\ R_{L \min} = \frac{V_Z}{I_{L \max}} = \frac{4.8}{4} = 1.2 \text{ K}\Omega \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{i \max} = \frac{V_{i \max} - V_Z}{R} = \frac{11 - 4.8}{1} = 6.2 \text{ mA} \\ I_{L \min} = I_{i \max} - I_{Z \max} \Rightarrow I_{L \min} = 6.2 - 7 = -0.8 \text{ mA} \\ R_{L \min} = \infty \end{array} \right.$$

✓ معرفی مدار دو برابر کننده ولتاژ

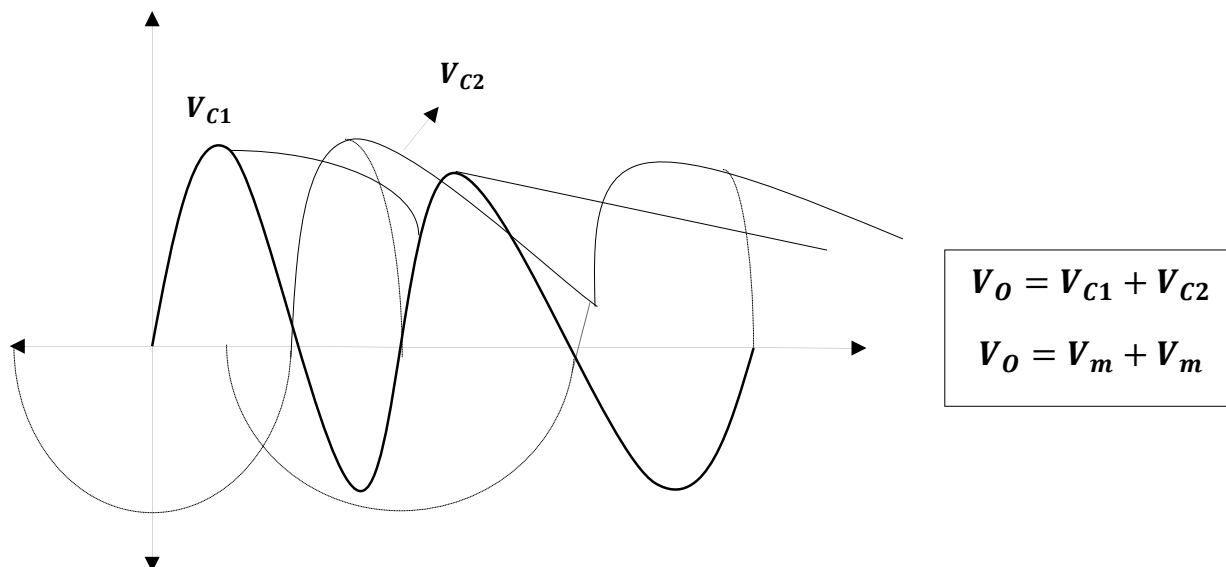
در این معرفی می خواهیم از یک ولتاژ با دامنه V_m ، یک ولتاژ DC با دامنه $2V_m$ به دست آوریم .

به مدار و روابط زیر توجه کنید :



$$V_i > 0 \Rightarrow V_{AB} > 0 \Rightarrow D_1 : ON , \quad C_1 : \text{شارژ} \quad \text{و} \quad V_{C1} = V_m$$

$$V_i < 0 \Rightarrow V_{AB} < 0 \Rightarrow D_2 : ON , \quad C_2 : \text{شارژ} \quad \text{و} \quad V_{C2} = V_m$$

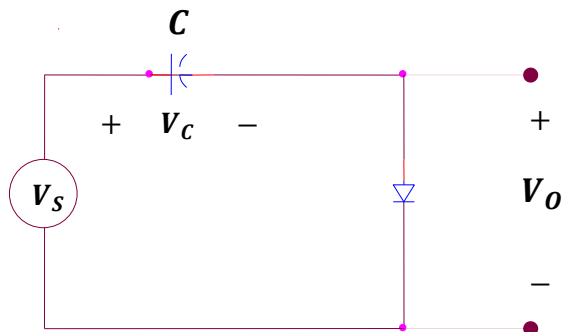


توضیح : با توجه به منحنی و با تامل به اینکه چون دیگر خازن های C_1 ، C_2 راهی برای تخلیه ندارند، پس ولتاژ V_m را حفظ می کنند . که بدین ترتیب مدار دو برابر کننده ولتاژ تبیین می شود .

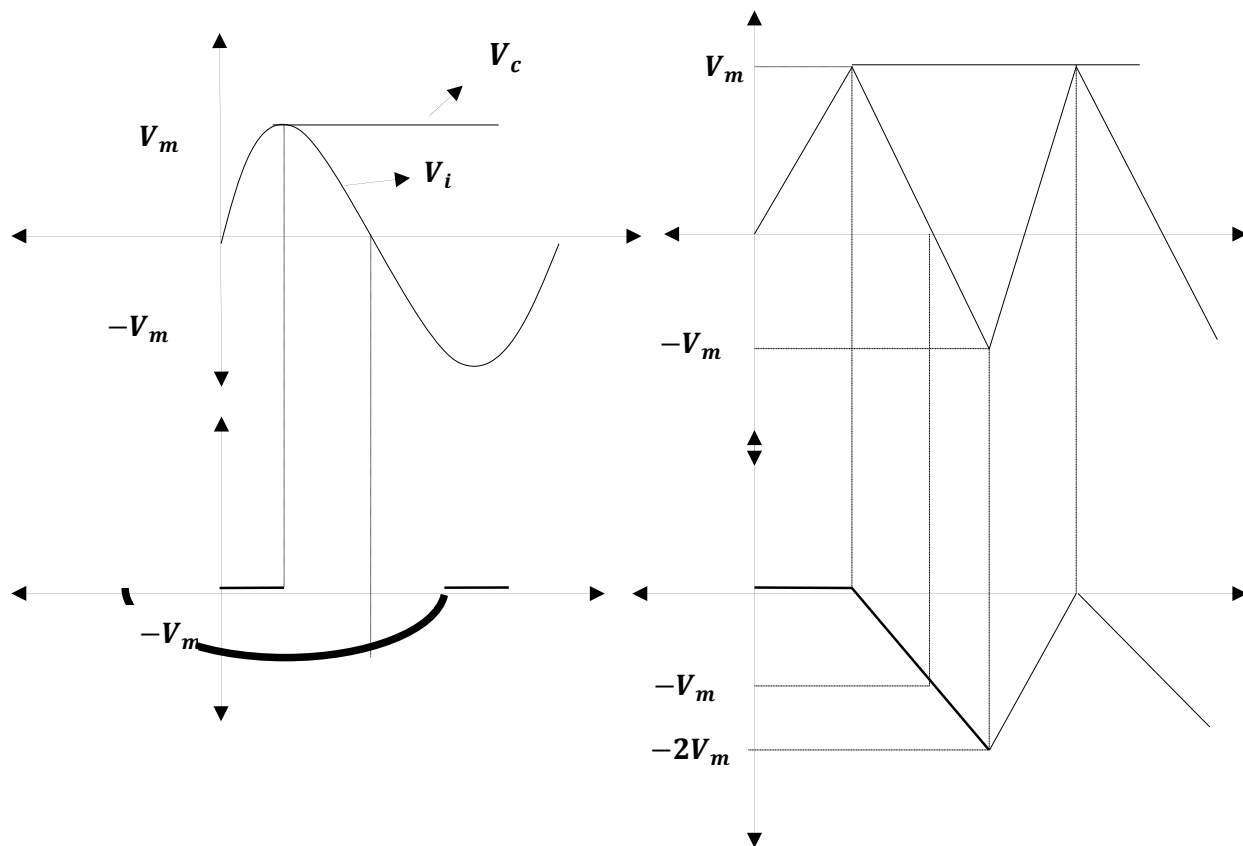
✓ معرفی *Clamp* در سطح صفر

توضیح : در واقع مدار *Clamp*، سطح *DC* سیگنال را تغییر ، یا به عبارتی، مقداری ولتاژ *DC* به سیگنال اضافه یا کم می نماید .

به مدار و منحنی های زیر توجه کنید :



$$V_O = V_S - V_C$$

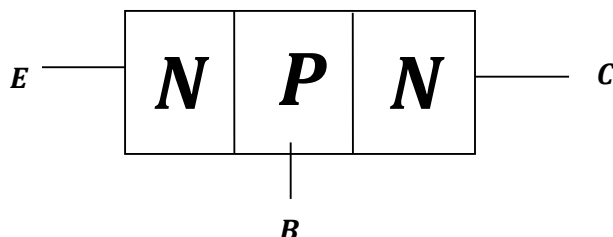


❖ فصل چهارم : ترانزیستور پیوندی دو قطبی (ترانزیستورهای Bjt)

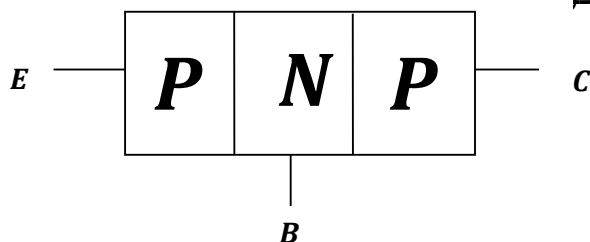
Bi polar Junction Transistor (Bjt)

در این فصل از درس، هدف این می باشد که برای شما ترانزیستور را معرفی کنیم و در رابطه با ویژگی های آن به بحث پردازیم، تا اینکه در فصول بعدی ب راحتی بتوانیم مدارهای شامل ترانزیستورها را تجزیه و تحلیل نماییم .

✓ اساس نوع اول ترانزیه



✓ اساس نوع دوم ترانزیستور



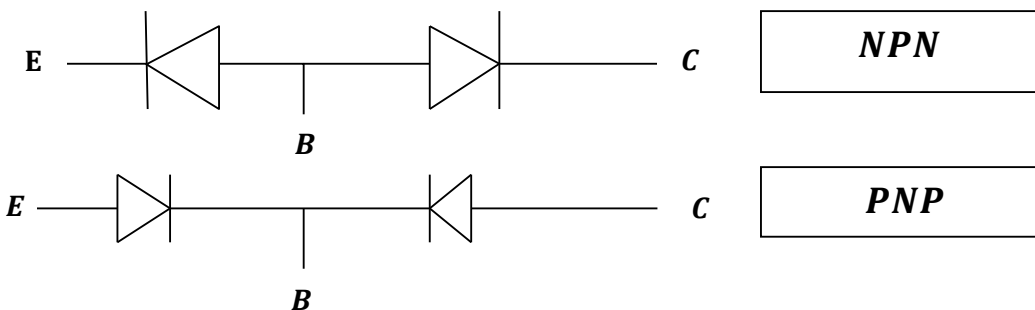
تذکر : در اساس ترانزیستورهای فوق داریم :

$E : \text{Emitter}$ (امیتر) \Rightarrow پخش کننده

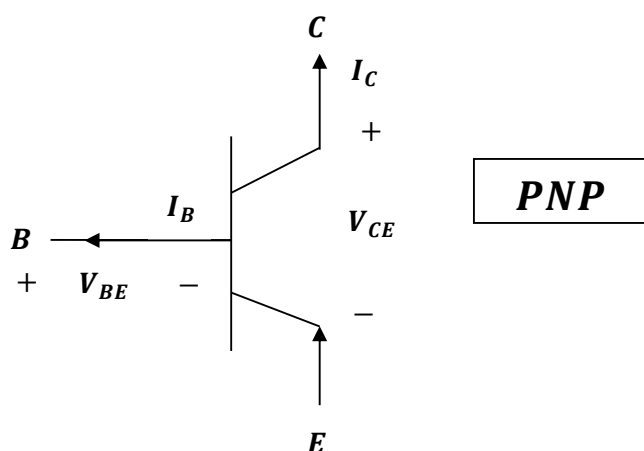
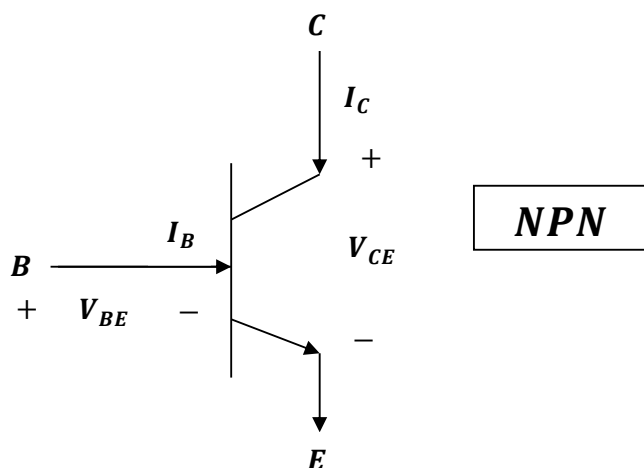
$B : \text{Base}$ (بیس) \Rightarrow پایه

$C : \text{Collector}$ (کلکتور) \Rightarrow جمع کننده

هم اکنون به کمک دو نوع اساس ترانزیستور فوق و به کمک دیود ها ، ترانزیستورها را معرفی می کنیم :



هم اکنون به شکل مداری ترانزیستورها خواهیم پرداخت :



روابط در ترانزیستور ها :

$$\text{قانون } KCL : I_E = I_B + I_C$$

$$\text{قانون } KVL : V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

* ویژگی‌های ساختمانی ترانزیستور :

- (۱) عرض ناحیه بیس و دانسیته (چگالی) ناخالصی آن بسیار کمتر از نواحی کلکتور و امیتر می باشد .
- (۲) دانسیته ناخالصی امیتر به مراتب بیشتر از نواحی دیگر است .
- (۳) عرض ناحیه کلکتور به مراتب بیشتر از نواحی دیگر است .

$$C \text{ عرض} < E \text{ عرض} < B \text{ عرض}$$

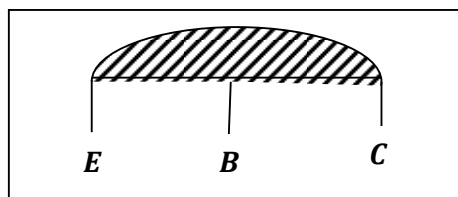
$$R_{B-C} < R_{B-E} < R_{C-E}$$

$$B \text{ چگالی} > C \text{ چگالی} > E \text{ چگالی}$$

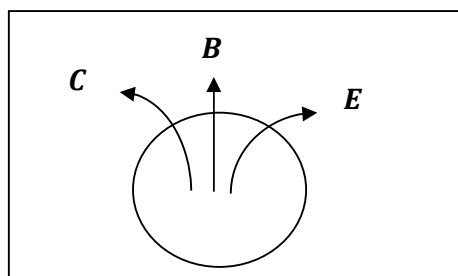
- نحوه شناخت تجربی پایه های ترانزیستور :
- (۱) مقاومت بیس - امیتر و مقاومت بیس - کلکتور کمتر از مقاومت کلکتور - امیتر می باشد .
 - (۲) مقاومت بیس - کلکتور کم تر از مقاومت بیس - امیتر می باشد .
 - (۳) به کمک جریان در ناحیه فعال ترانزیستور

نکته :

اگر به از روبرو به ترانزیستور نگاه کنیم :



اگر از زیر به ترانزیستور نگاه کنیم :



به جدول زیر در رابطه با ویژگی های ساختمانی و کاربرد ترانزیستورها توجه کنید :

کاربرد	پیوند $B - C$	پیوند $B - E$	ناحیه کاری
به عنوان تقویت کننده توان	<i>Reverse</i>	<i>Forward</i>	<i>Active Linear</i> ناحیه فعال
<i>Switch On</i>	<i>Forward</i>	<i>Forward</i>	<i>saturation</i> ناحیه اشباع
<i>Switch Off</i>	<i>Reverse</i>	<i>Reverse</i>	<i>cut off</i> ناحیه قطع
کاربردی ندارد	<i>Forward</i>	<i>Reverse</i>	<i>Reverse Active</i> ناحیه معکوس

✓ مولفه های جریان Bjt در بایاس *Active*

ابتدا به معرفی مولفه جریان ها پرداخته و سپس شکل مربوطه را ترسیم می کنیم .

جریان ناشی از حفره های امیتر $I_{PE} =$

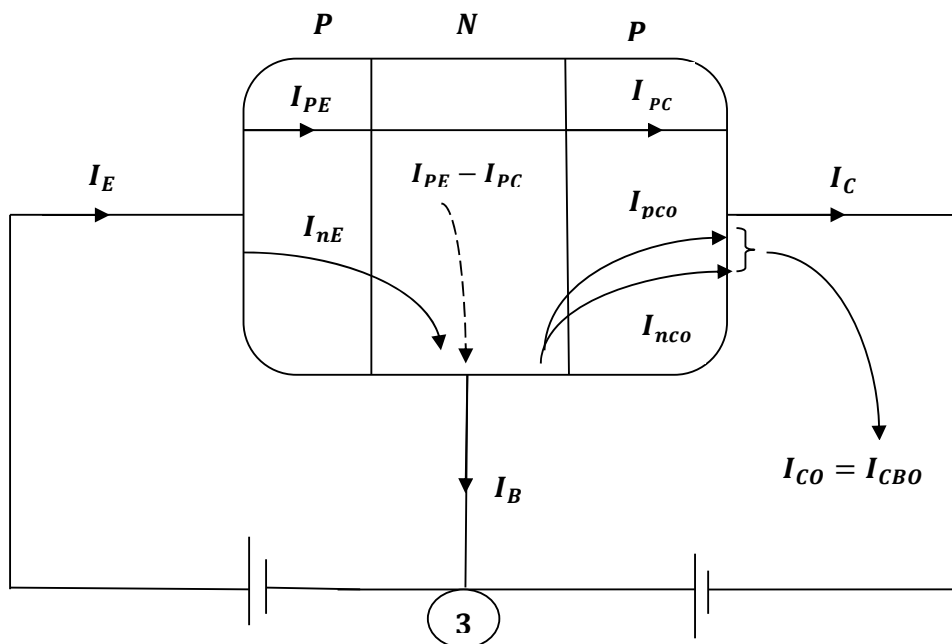
جریان ناشی از حفره های تزریق شده امیتر که از *Base* گذشته و به *Collector* رسیده $I_{PC} =$

جریان ناشی از حرکت الکترون های *Base* به سمت *Emitter* $I_{nE} =$

جریان ناشی از حرکت حفره های $I_{PCO} = \text{Base}$

$I_{nco} = \text{collector}$ جریان ناشی از حرکت الکترون های

به شکل زیر توجه کنید :



$$I_E = I_{nE} + I_{PE} \Rightarrow I_E \cong I_{PE}$$

با توجه به اینکه چگالی حفره ها در امیتر بیش تر از چگالی الکترونهای آن در بیس می باشد پس در نتیجه از I_{nE} در مقابل I_{PE} می توان چشم پوشی کرد .

$$I_C = I_{PC} + I_{CO} = \alpha I_E + I_{CO}$$

$$\alpha^* = \frac{I_{PC}}{I_{PE}} \cong 1 \text{ \& } < 1 \quad \text{Base انتقال} \quad \text{PE دارد} \quad \text{PC سهمی از}$$

$$\gamma = \frac{I_{PE}}{I_E} \quad \text{بازده تزریق}$$

$$\alpha = \frac{I_{PC}}{I_E} = (\alpha^*) \times \gamma = \frac{I_{PC}}{I_{PE}} \times \frac{I_{PE}}{I_E} \cong 1 \text{ \& } < 1 \quad \text{نسبتی از جریان امیتر که به کلکتور رسیده است}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_C = \alpha I_E + I_{CO} \\ \text{قانون KCL در گره 3: } I_E = I_B + I_C \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} I_C = \alpha I_B + \alpha I_C + I_{CO} \\ I_C - \alpha I_C = \alpha I_B + I_{CO} \end{array} \right. \Rightarrow$$

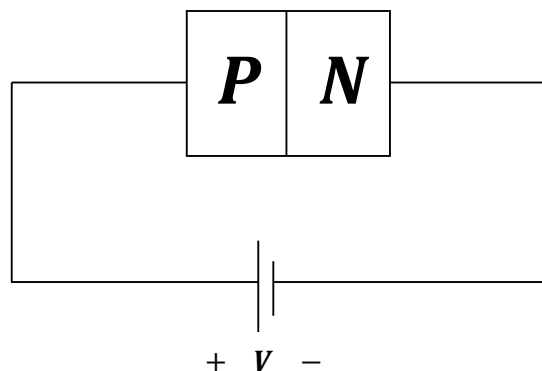
$$\Rightarrow \begin{cases} I_C = \frac{\alpha I_B + I_{CO}}{1-\alpha} \\ I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{CO} \end{cases} \Rightarrow \text{ بهره جریان } = \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad \& \quad \alpha = \frac{\beta}{1+\beta}$$

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CO} \quad \text{در ناحیه فعال داریم}$$

به کمک تقریب خواهیم داشت :

$$I_C = \beta I_B \quad \Rightarrow I_E = I_B + I_C \quad \& \quad I_E = I_B + \beta I_B = (1 + \beta) I_B$$

✓ روابط عمومی برای جریان کلکتور :



$$\left\{ \begin{array}{l} I = I_S \left(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1 \right) = I_{CO} \left(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1 \right) \\ V > 0 \Rightarrow I = I_S \left(e^{\frac{V}{\eta V_T}} \right) \\ V < 0 \Rightarrow I = -I_S \end{array} \right.$$

$$I_C = \alpha I_E - I_{CO} \left(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

$$V_C : \Rightarrow \begin{cases} (forward) : NPN \Rightarrow V_C = V_{CB} \\ (Reverse) : PNP \Rightarrow V_C = -V_{CB} \end{cases}$$

$$V_C > 0 \Rightarrow Forward \Rightarrow I_C = \alpha I_E - I_{CO} e^{\frac{V_C}{\eta V_T}} \Rightarrow \text{ناحیه اشباع}$$

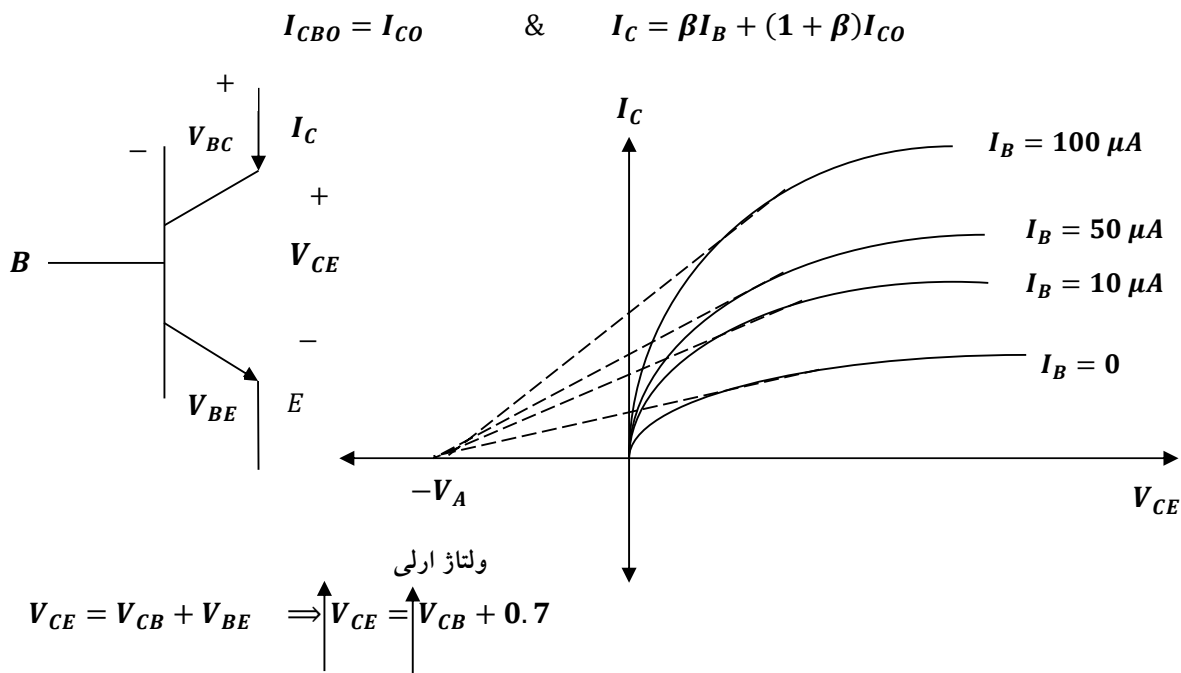
$$V_C < 0 \Rightarrow Reverse \Rightarrow I_C = \alpha I_E + I_{CO} \Rightarrow \text{ناحیه فعال}$$

$$**** I_C(Sat) < I_C(Active) ****$$

$$\Rightarrow I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CO} \Rightarrow \begin{cases} I_C \cong \beta I_B \Rightarrow I_C(sat) < \beta I_B \\ \beta' = \frac{I_C(sat)}{I_B} \Rightarrow \beta' < \beta \end{cases}$$

ناحیه فعال

✓ اثر ارلی (Early Effect)



اثر ارلی (مدلاسیون عرض Base):

در صورتیکه β ثابت باشد اگر I_B ثابت بماند در ناحیه فعال منحنی I_C می بایست ثابت و افقی بماند. اما با افزایش V_{CE} به دلیل ثابت بودن ولتاژ $V_{BE} = 0.7$ ، منجر به افزایش V_{CB} می شود. افزایش ولتاژ V_{CB} نیز عرض موثر $Base$ را افزایش داده و منجر به افزایش α و β می شود، بنابراین می توان بیان کرد که افزایش V_{CE} اثر خود را روی β می گذارد.

$$50 < V_{-A} < 100 \text{ (مدار مجتمع)} \quad \& \quad I_C = I_S \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right) e^{\frac{V_{BE}}{\eta V_T}}$$

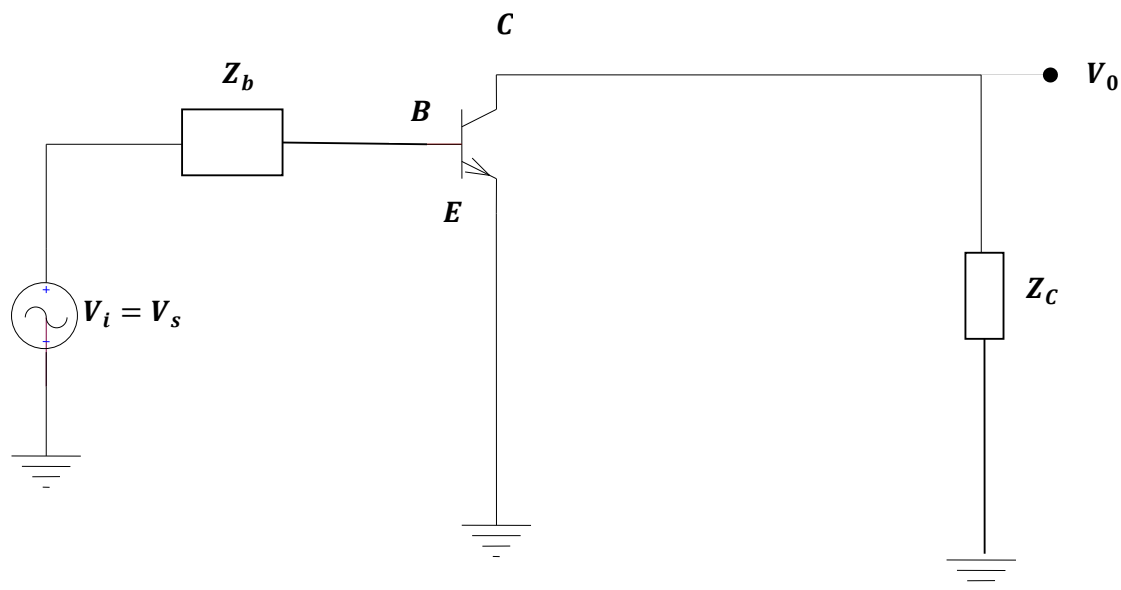
به جدول زیر توجه کنید:

ماده مورد نظر (عنصر)	مرز قطع و فعال V_{BE}	Active $V_{BE(on)}$	مرز فعال و اشباع $V_{BE(sat)}$	مرز فعال و اشباع $V_{CE(Sat)}$
Si	0.5	0.7	0.8	0.2
Ge	0.1	0.2	0.3	0.1

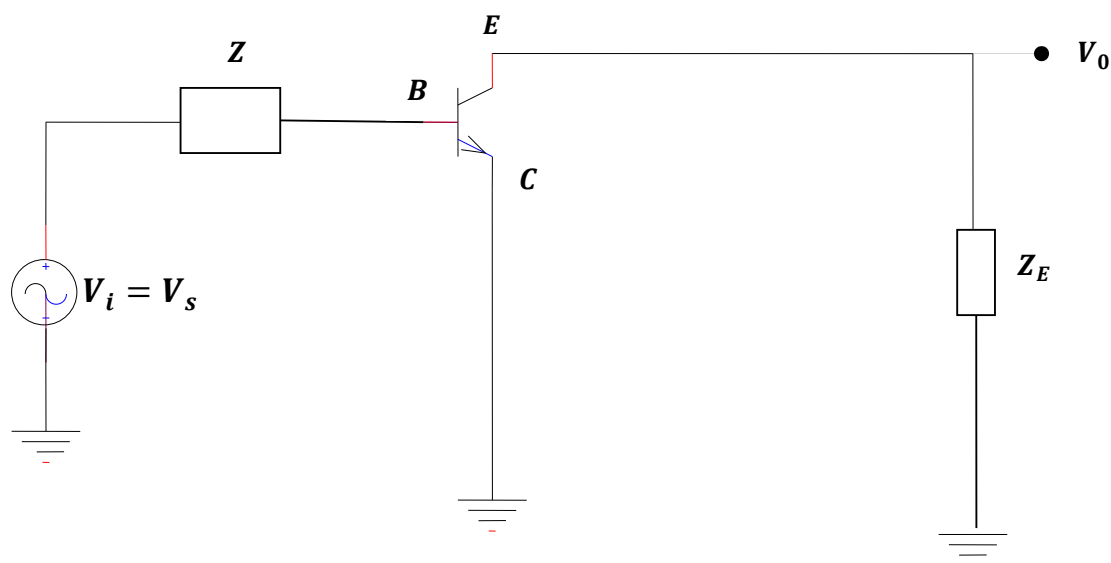
✓ معرفی انواع فرم های ترانزیستورهای BJT

ترانزیستور های BJT را عمدتاً به یکی از سه فرم زیر طراحی می کنند .

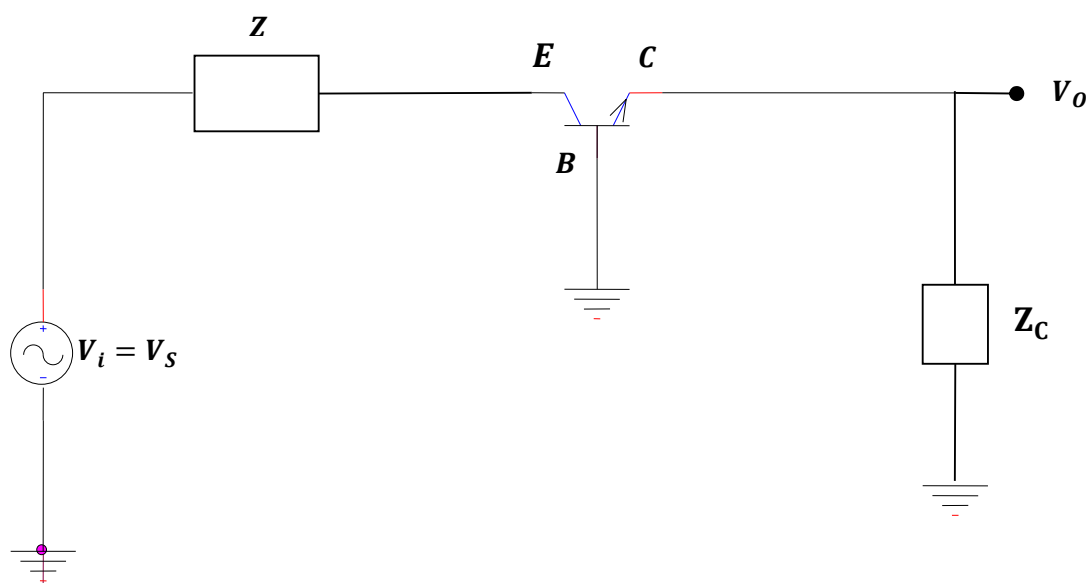
(۱) امیتر مشترک (CE : Common Emitter)



(۲) کلکتور مشترک (CC : Common Collector) : (امیتر پیرو Emitter Follower)



(۳) بیس مشترک (CB : Common Base)



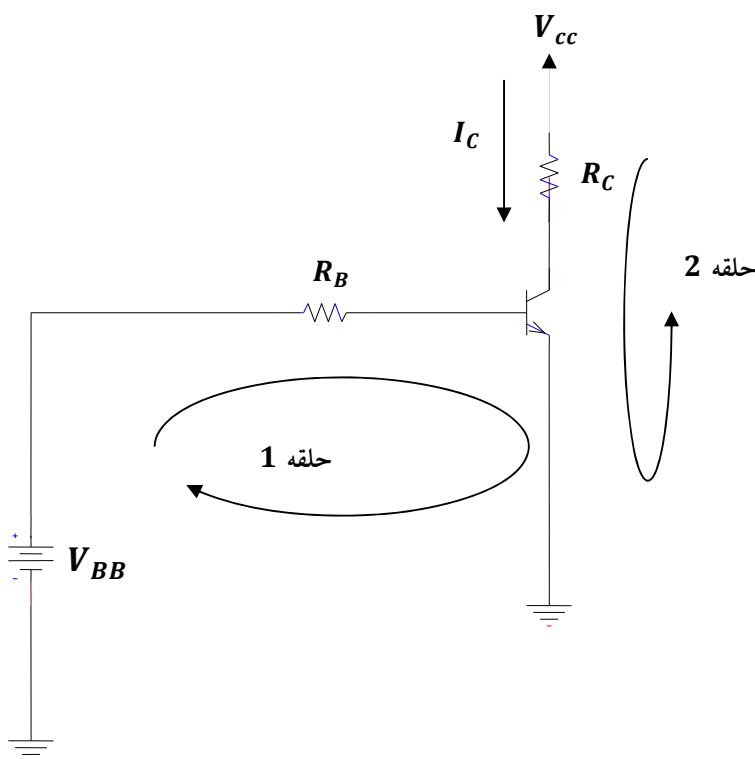
➤ فصل پنجم :

طراحی مدارهای بایاس ترانزیستور (تحلیل DC و تحلیل سیگنال کوچک Bjt)

برای شروع این فصل به مدار شکل زیر و یافتن نقطه کار ترانزیستور می پردازیم .
همواره در مدارهای شامل ترانزیستور برای پیدا کردن نقطه کار ترانزیستور باید تحلیل DC را انجام داد . بهتر است برای شروع به تعریف نقطه کار ترانزیستور توجه کنیم :

❖ نقطه کار :

نقطه کار عبارت است از، نقطه ای از منحنی های مشخصه خروجی تقویت کننده که مختصات آن جریان خروجی و ولتاژ خروجی است .
به کمک مدار زیر مراحل یافتن نقطه کار را بیان می کنیم :



با نوشتن قانون KVL در دو حلقه شماره یک و دو خواهیم داشت :

$$\text{Step 1} \Rightarrow \text{ kvl in 1 : } V_{BB} = R_B \cdot I_B + V_{BE} \Rightarrow I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

$$\text{Step 2} \Rightarrow \text{ kvl in 2 : } V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE} \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = V_{CC} - R_C \beta I_B$$

ابتدا با نوشتن قانون KVL در حلقه ورودی مدار و با فرض اینکه در ناحیه فعال قرار دارد ،
جریان ورودی I_B را محاسبه می کنیم و سپس با نوشتن قانون KVL در حلقه خروجی یک

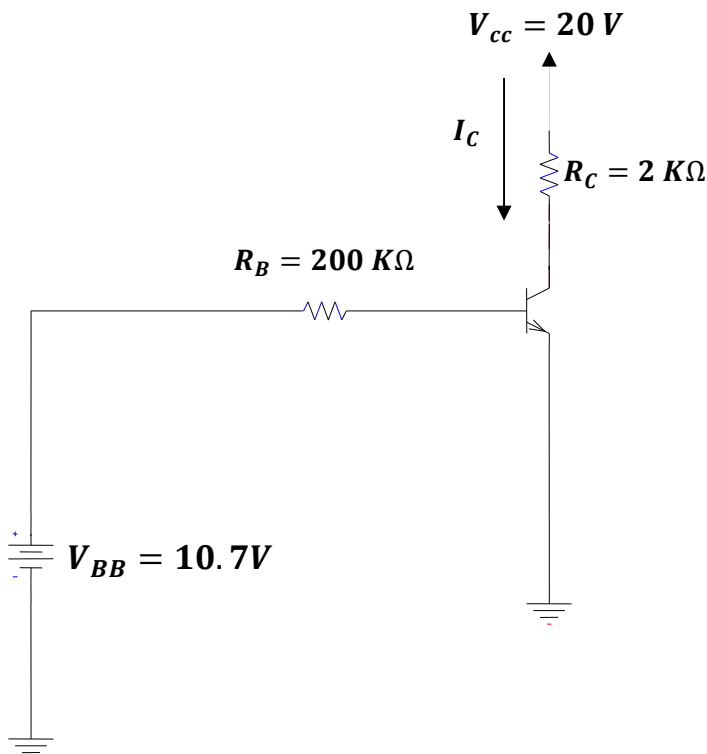
ارتباط خطی بین جریان و ولتاژ خروجی در نقطه کار به دست می آوریم که به آن خط بار DC ($DC\ load\ line$) نام دارد .

$$Q(I_{CEQ}, V_{CEQ})$$

سپس بعد از به دست آوردن جریان ورودی و فرض فعال بودن، جریان خروجی را با $I_C = \beta I_B$ را به دست می آوریم . و سپس از قانون KVL دوم ولتاژ V_{CE} را محاسبه کرده ، اگر بزرگتر از 0.2 بود ، نشان می دهد فرض فعال درست بوده و مقادیر به دست آمده نیز صحیح هستند اما در غیر این صورت ولتاژ V_{CE} را برابر با 0.2 قرار داده (فرض اشباع) و جریان های I_C و I_B را محاسبه می نمایم .

تذکر:

توجه داشته باشیم که در حالتی که ولتاژ V_{CE} را برابر با 0.2 قرار می دهیم (فرض اشباع)، دیگر حق استفاده از مقادیری را که در فرض فعال بودن به دست آورده ایم را نخواهیم داشت .
مثال ۱) در مدار شکل زیر ناحیه کار ترانزیستور را تعیین نمایید .



مفروضات مسئله : $V_{CE} = 0.2$, $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} = 100$

ب) اگر مقاومت R_C به مقدار ۴ کیلو اهم افزایش یابد آن گاه ناحیه کاری را تعیین نمایید .

حل : با نوشتن قانون KVL در دو حلقه ورودی و خروجی داریم :

$$\begin{aligned} \text{in } 1 \text{ } kvl : \Rightarrow I_B &= \frac{V_{BB} - V_{BE(on)}}{R_B} = \\ &= \frac{10.7 - 0.7}{200} = 0.05\ mA \end{aligned}$$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 0.05 = 5 \text{ mA}$$

\Rightarrow بررسی صحت فرض : *kvl in 2 (output)* :

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 20 - 2 \times 5 = 10 \text{ V} > V_{CE(on)} = 0.2 \text{ (correct)}$$

$$\Rightarrow Q (I_{CQ} = 5 \text{ mA} , V_{CQ} = 10 \text{ Volt})$$

(ب)

فرض ناحیه فعال : *kvl in 1* : $\Rightarrow I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE(on)}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{200} = 0.05 \text{ mA}$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 0.05 = 5 \text{ mA}$$

\Rightarrow بررسی صحت فرض : *kvl in 2 (output)* :

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 20 - 4 \times 5 = 0 < V_{CE(on)} = 0.2 \text{ (Not)}$$

پس فرض فعال نادرست می باشد و باید شرط اشباع بودن را اجرا نماییم .

فرض ناحیه اشباع : $v_{CE} = 0.2 \Rightarrow v_{cc} = R_C I_C + V_{CE(sat)} \Rightarrow$

$$\Rightarrow I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C} = \frac{20 - 0.2}{4} = 4.9 \text{ mA} < \beta I_B = 5 \text{ mA (Correct)}$$

$$\Rightarrow Q (I_{CQ} = 4.9 \text{ mA} , V_{CQ} = 0.2 \text{ Volt})$$

نکته : حداقل جریان *Base* برای اینکه ترانزیستور در ناحیه اشباع باقی بماند در صورتیکه $\beta_{min} < \beta < \beta_{max}$:

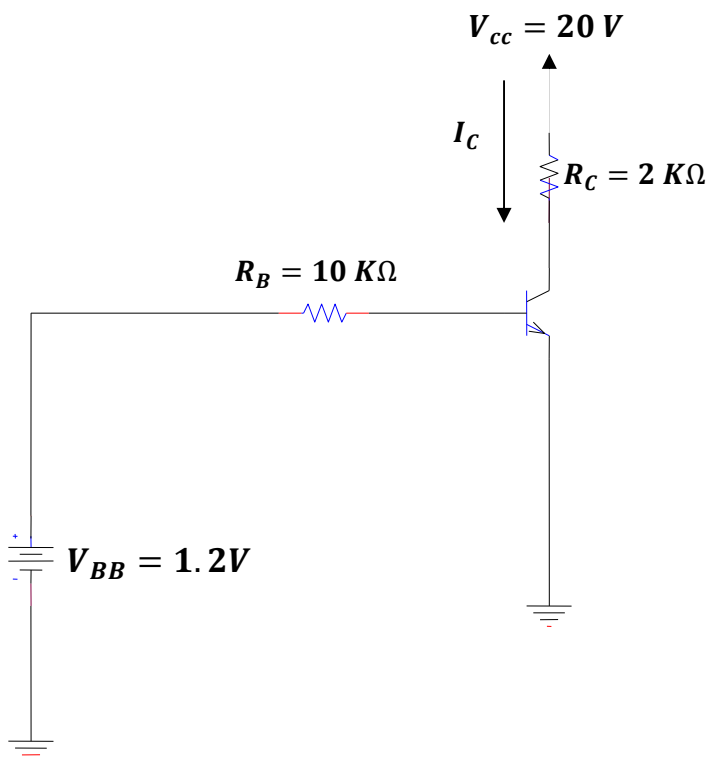
$$\beta_{min} < \beta < \beta_{max} \Rightarrow I_C(sat) = \beta I_{B min} \Rightarrow I_{B min} = \frac{I_C(sat)}{\beta_{min}}$$

مثال ۲) در مدار شکل زیر اگر داشته باشیم : $V_{BE} = 0.7$ & $\beta = 100$

الف) ناحیه کاری تعیین نمایید .

ب) فرض کنید $V_{BB} = 2.7$ و سپس قسمت الف را تکرار کنید .

ج) حداقل V_{BB} را برای اشباع ماندن ترازیستور تعیین نمایید .



الف (حل : با نوشتن قانون KVL در دو حلقه ورودی و خروجی داریم :

$$kvl \text{ in } 1 : \Rightarrow I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE(on)}}{R_B} = \frac{1.2 - 0.7}{10} = 0.05 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 0.05 = 5 \text{ mA}$$

\Rightarrow بررسی صحت فرض : $kvl \text{ in } 2 \text{ (output)} :$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 20 - 2 \times 5 = 10 \text{ V} > V_{CE(on)} = 0.2 \text{ (correct)}$$

$$\Rightarrow Q (I_{CQ} = 5 \text{ mA} , V_{CQ} = 10 \text{ Volt})$$

(ب)

$$kvl \text{ in } 1 : \Rightarrow I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE(on)}}{R_B} = \frac{2.7 - 0.7}{10} = 0.2 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 0.2 = 20 \text{ mA}$$

\Rightarrow بررسی صحت فرض : $kvl \text{ in } 2 \text{ (output)} :$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 20 - 2 \times 20 = -20 < V_{CE(on)} = 0.2 \text{ (Not)}$$

پس فرض فعال نادرست می باشد و باید شرط اشباع بودن را اجرا نماییم .

$$v_{CE} = 0.2 \Rightarrow v_{cc} = R_C I_C + V_{CE(sat)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C} = \frac{20 - 0.2}{2} = 9.9 \text{ mA} < \beta I_B = 20 \text{ mA} \text{ (Correct)}$$

$$\Rightarrow Q(I_{CQ} = 9.9 \text{ mA}, V_{CEQ} = 0.2 \text{ Volt})$$

(ج)

$$\beta_{min} < \beta < \beta_{max} \Rightarrow I_C(sat) = \beta I_{B min} \Rightarrow I_{B min} = \frac{I_C(sat)}{\beta_{min}}$$

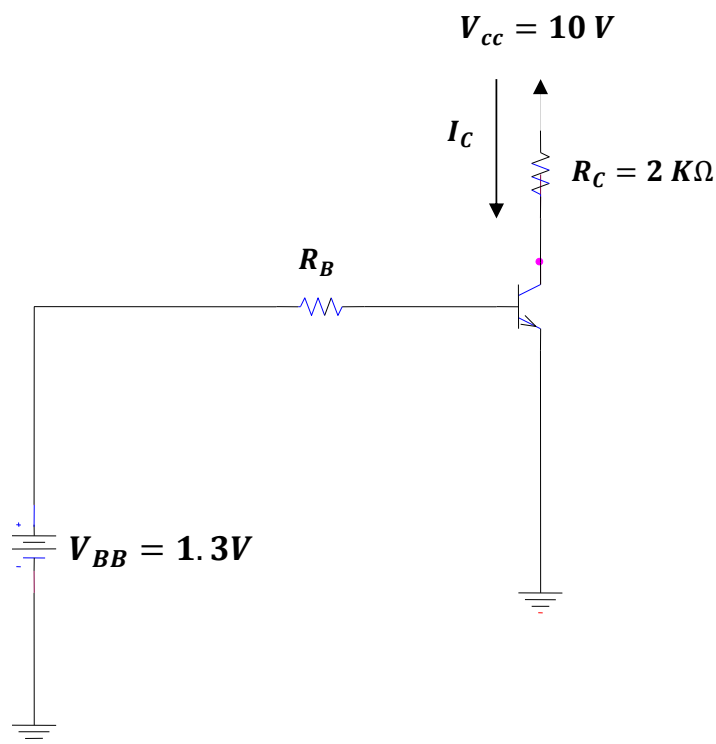
$$I_{B min} = \frac{I_C(sat)}{\beta_{min}} = \frac{9.9 \text{ mA}}{100} = 0.099 \text{ mA}$$

$$V_{BB min} = R_B \cdot I_B + V_{BE} = 10 \times 0.099 + 0.7 = 1.69 \text{ Volt}$$

تذکر: ولتاژ V_{BE} را در ناحیه فعال و ناحیه اشباع برابر با 0.7 در نظر می گیریم. مگر آنکه خود مسئله برای حالت های اشباع و فعال مقادیر جداگانه بدهد و هم چنین ولتاژ V_{CE} را در حالت اشباع اکثرا برابر با 0.2 در نظر خواهیم گرفت.

مثال ۳) در مدار شکل زیر اگر نقطه کار $Q(I_{CQ} = 2.5 \text{ mA}, V_{CEQ} = 5 \text{ volt})$ مفروض باشد. آنگاه مقاومت بیس R_B را تعیین نمایید.

ب) اگر در همین مدار ولتاژ V_{BB} از 1.3 به 6.1 ولت تغییر نماید آنگاه ناحیه کاری ترانزیستور را تعیین نمایید.



مفروضات مسئله :

$$\beta = 125 \quad \& \quad V_{CE}(sat) = 0.2 \text{ volt} \quad \& \quad V_{BE}(on) = 0.7 \text{ volt}$$

حل : الف :

$$I_C = \beta I_B \Rightarrow I_B = \frac{2.5}{125} = 0.02 \text{ mA}$$

$$KVL : V_{BB} = R_B I_B + V_{BE}(on) \Rightarrow R_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}(on)}{I_B} = \frac{1.3 - 0.7}{0.02} = 30 \text{ K}\Omega$$

ب)

$$V_{BB} = R_B I_B + V_{BE}(on) \Rightarrow I_B = \frac{6.1 - 0.7}{30} = 0.18 \text{ mA}$$

$$\text{فرض ناحیه فعال} : I_C = \beta I_B = 125 \times 0.18 = 22.5 \text{ mA}$$

$$kvl \text{ in } 2 \text{ (output)} : V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} \Rightarrow V_{CE} = 10 - 22.5 \times 2 = -35 < 0.2$$

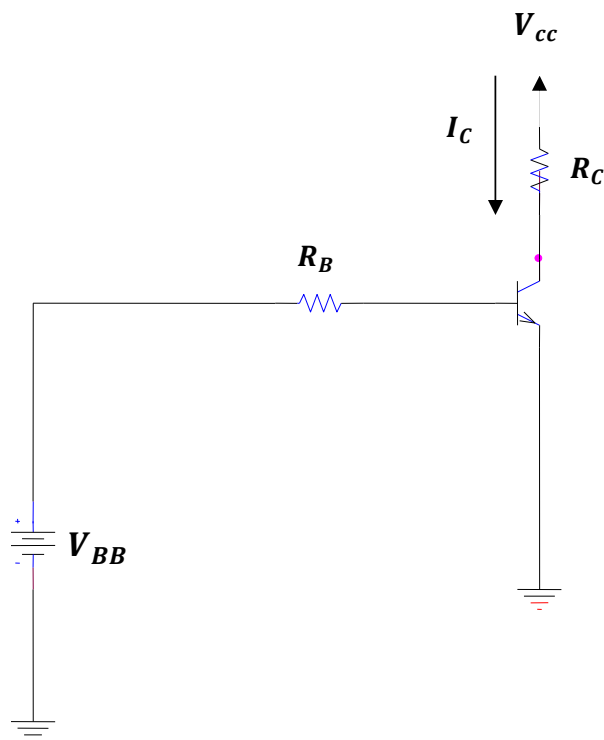
پس فرض فعال نادرست می باشد و باید شرط اشباع بودن را اجرا نماییم .

$$\text{فرض ناحیه اشباع} : v_{CE} = 0.2 \Rightarrow v_{cc} = R_C I_C + V_{CE}(sat) \Rightarrow$$

$$I_C(sat) = \frac{V_{cc} - V_{CE}(sat)}{R_C} = 4.9 \text{ mA} < 22.5 \text{ mA}$$

$$Q(I_{CEQ} = 4.9 \text{ mA} , V_{CEQ} = 0.2 \text{ volt})$$

✓ طراحی مدارهای بایاس



معایب روش بایاس در مدار فوق :

(۱) برای بایاس کردن نیاز به دو منبع ولتاژ مستقل داریم .

(۲) وجود رانش حرارتی در ترانزیستور

فیدبک مثبت \Rightarrow افزایش $I_C \Rightarrow$ گرم شدن $T \Rightarrow$ افزایش $I_C \Rightarrow$ گرم شدن ترانزیستور

• عدم پایداری حرارتی در ترانزیستور

(۳) وابستگی شدید نقطه کار نسبت به تغییرات β (وابستگی شدید I_C به β)

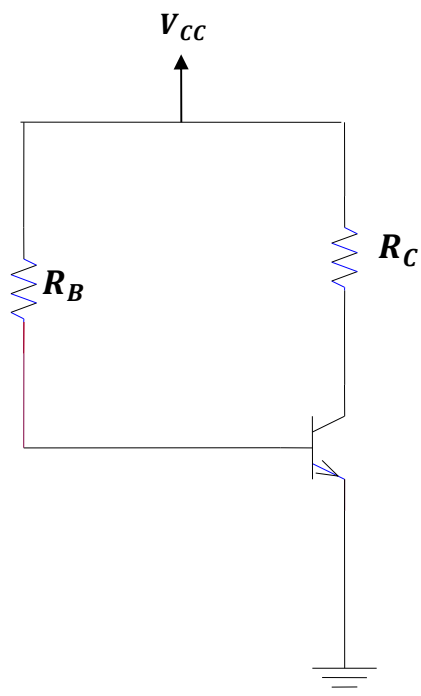
همانطوریکه مشاهده می شود مشکلات فوق برای روش بایاس مدار فوق بودند هم اکنون برای از بین بردن مشکلات مدارهای جدیدی را معرفی نموده تا اینکه در نهایت به روش بایاس مداری خواهیم رسید که هیچ کدام از این مشکلات را نداشته باشد .

الف (حذف مشکل منبع (مدار شماره ۲)

در این مدار مشکلی بنام وجود دو منبع مستقل را نخواهیم داشت ولی هنوز مشکلات بعدی در این مدار وجود دارند .

برای حذف این مشکل ما از طریق یک منبع ولتاژ مستقل هر دو مقاومت R_C , R_B را تغذیه خواهیم نمود .

تذکر : در مدار شماره ۲ ، مقاومت بیس R_B خیلی بزرگ بوده و باعث افت ولتاژ بسیاری خواهد شد .

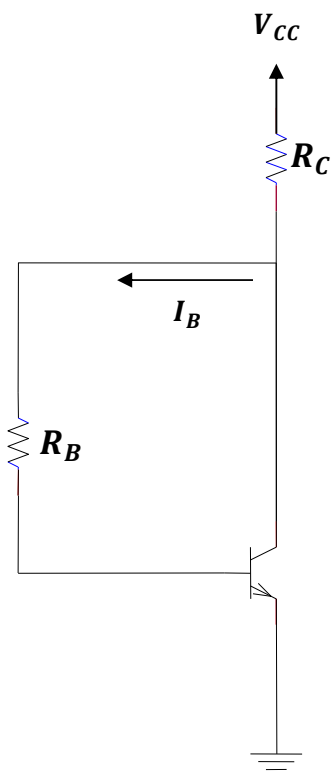


مدار شماره ۲

از بین رفتن مشکل دو منبع مستقل، چرا که
در این مدار تنها فقط یک منبع مستقل
داریم .

مدار بایاس شماره ۳ :

در این مدار مشکل وجود دو منبع مستقل و هم چنین مشکل عدم پایداری حرارتی و رانش
حرارتی از بین می روند .



$$V_{CC} = R_C(I_C + I_B) + V_{CE} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_B = \frac{V_C - V_{BE}}{R_B} \quad \text{معادله شماره 1}$$

$$I_C = \beta I_B \quad \text{معادله شماره 3}$$

$$V_C = V_{CE} = V_{CC} - R_C(I_C + I_B) , \quad \text{معادله شماره 2}$$

به کمک معادلات شماره ۱ و ۳ و ۲ نشان خواهیم داد که مشکل عدم پایداری حرارتی و رانش حرارتی در ترانزیستور از بین می رود .

فیدبک منفی \Rightarrow کاهش $I_C \Rightarrow$ کاهش I_B $\xRightarrow{\text{معادله شماره 1}}$ کاهش V_C $\xRightarrow{\text{معادله شماره 2}}$ افزایش $I_C \Rightarrow$ گرم شدن ترانزیستور

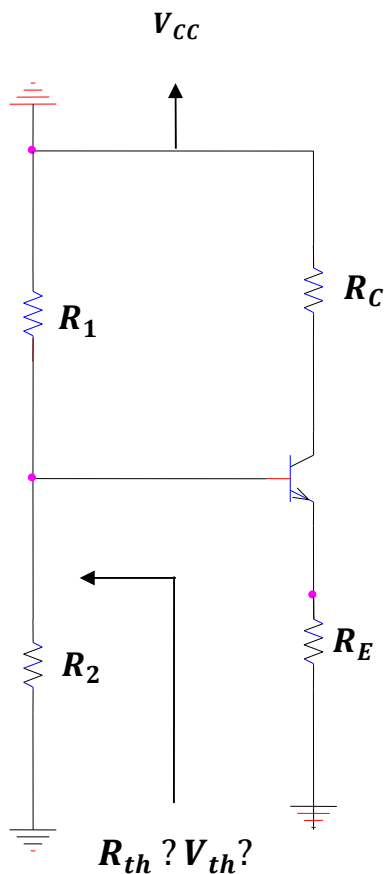
$$V_C = V_{CC} - R_C(I_C)$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = V_C - 0 = V_C$$

 فیدبک منفی باعث می شود که دیگر I_C افزایش پیدا نکند و دیگر ترانزیستور گرم تر نشود .

مدار بایاس شماره ۴ : خود بایاس (سلف بایاس)

در این مدار همه مشکلات بیان شده از بین می روند .



$$R_{th} = R_1 || R_2$$

$$V_{th} = V_{BB} = V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

نکته : برای یافتن مقاومت معادل تونن ، با صفر کردن منبع ولتاژ V_{CC} ، دو مقاومت R_1 , R_2 با هم موازی می شوند .

هم اکنون به بررسی مشکلات می پردازیم :

$$V_E = R_E \cdot I_E \quad \& \quad I_C = \beta I_B \quad \& \quad I_B = \frac{I_E}{1 + \beta}$$

$$V_B = R_E I_E + V_{BE(on)}$$

$$V_{BB} = V_{th} = R_E I_E + V_{BE(on)} + R_{th} I_B \Rightarrow V_{BB} = R_E I_E + V_{BE(on)}$$

تذکر : در رابطه فوق از عبارت $R_{th}I_B$ صرفنظر می کنیم چرا که جریان I_B در محدوده میکرو آمپر می باشد .

نشان دادن از بین رفتن مشکل عدم پایداری حرارتی و رانش حرارتی :

فیدبک منفی \Rightarrow کاهش $I_C \Rightarrow$ کاهش $I_E \Rightarrow$ کاهش $V_{BE} \Rightarrow$ افزایش $V_E \Rightarrow$ افزایش $I_C \Rightarrow$ افزایش دما T

$$Cte = V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = V_B = \begin{matrix} \downarrow & & \uparrow \\ V_{BE} & + & V_E \end{matrix}$$

بررسی پایداری نقطه کار نسبت به β در مدار :

✓ قضیه انعکاس

$$V_{BB} = V_{th} = R_{th}I_B + V_{BE} + R_E I_E$$

$$R_{th} = R_1 || R_2 = R_B = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_C = \beta I_B \Rightarrow I_E = I_C + I_B = \beta I_B + I_B = (1 + \beta)I_B$$

$$V_{BB} = R_B \cdot \frac{I_E}{1 + \beta} + V_{BE} + R_E I_E \Rightarrow I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{\frac{R_B}{1 + \beta} + R_E}$$

بیان قضیه انعکاس در ترانزیستورهای BJT :

(۱) مقاومت های بیس از دید امیتر با توجه به رابطه فوق تقسیم بر $1 + \beta$ می شوند .

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{\frac{R_B}{1 + \beta} + R_E}$$

(۲) مقاومت های امیتر طبق قضیه انعکاس از دید بیس در $1 + \beta$ ضرب می شوند .

$$I_E = (1 + \beta)I_B \Rightarrow I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E(1 + \beta) + R_B}$$

به کمک رابطه نکته شماره ۱ در فوق، به صورت زیر استفاده می کنیم .

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{\frac{R_B}{1 + \beta} + R_E} , \quad \text{If } R_E \gg \frac{R_B}{1 + \beta} \Rightarrow I_E \cong \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E}$$

در صورت برقراری شرط فوق نقطه کار از تغییرات β تقریباً مستقل می گردد که این شرط را غالباً به شکل زیر در نظر می گیریم.

$$\frac{R_E}{10} = \frac{R_B}{1 + \beta} \Rightarrow R_B = \frac{1 + \beta}{10} R_E \cong \frac{\beta}{10} R_E$$

بنابراین هر گاه از پایداری نقطه کار صحبت شد همواره باید از شرط زیر استفاده کنیم :

$$R_B = \frac{\beta}{10} R_E$$

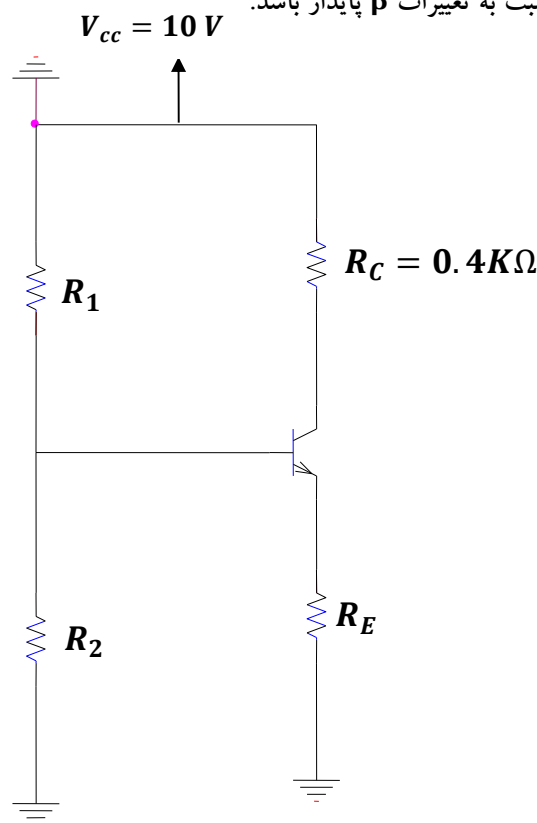
تذکر : توجه شود که اگر مقدار β دارای مینیمم و ماکزیمم بود شرط فوق به صورت زیر مورد استفاده قرار می گیرد .

$$R_B = \frac{\beta_{min}}{10} R_E$$

نکته : در صورتیکه β متغیر باشد برای استقلال نقطه کار از مقدار β_{min} استفاده می شود در صورتی که برای محاسبه $I_C = \beta I_B$ & $I_E = (1 + \beta) I_B$ ، باید از $\beta_{average}$ استفاده کرد .

$$\beta_{average} = \frac{\beta_{min} + \beta_{max}}{2}$$

مثال ۱) در مدار شکل زیر $40 < \beta < 120$ ، مقادیر R_1 ، R_2 ، R_E را طوری تعیین کنید که $Q(10mA, 5volt)$ و نقطه کار نسبت به تغییرات β پایدار باشد.



حل : بعد از مدار معادل تونن داریم :

$$KVL \text{ in Output} : V_{CE} = V_{CC} - R_E I_E - R_C I_C \Rightarrow$$

$$5 = 10 - 0.4 \times 10 - R_E \times 10 \Rightarrow R_E = 100\Omega = 0.1 K\Omega$$

$$V_B = R_E I_E + V_{BE(on)} \Rightarrow V_B = 0.1 \times 10 + 0.7 = 1.7 \quad \& \quad I_B = \frac{I_C}{\beta_{ave}} = \frac{10}{80} = \frac{1}{8}$$

$$KVL \text{ in Input : } V_{BB} = V_B + R_B I_B = 1.75$$

$$V_{BB} = V_{th} = V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow 1.75 = 10 \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} , \quad \text{رابطه شماره 1}$$

$$R_B = \frac{\beta_{min}}{10} R_E = \frac{40}{10} \times 0.1 = 0.4 \Rightarrow R_B = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = 0.4 \Rightarrow \text{رابطه شماره 1}$$

$$R_1 = R_B \times \left(\frac{V_{CC}}{V_{BB}} \right) = 2.3 K\Omega \quad \& \quad R_2 = R_B \times \left(\frac{1}{1 - \frac{V_{BB}}{V_{CC}}} \right) = 0.485 K\Omega$$

تذکر: در ناحیه قطع جریان امیتر صفر است.

$$I_E = 0, I_C = I_{CO} = I_{CBO}$$

✓ حداکثر سوئینگ متقارن

کاربرد ترانزیستور ها در ناحیه فعال: تقویت کننده (جریان - ولتاژ)

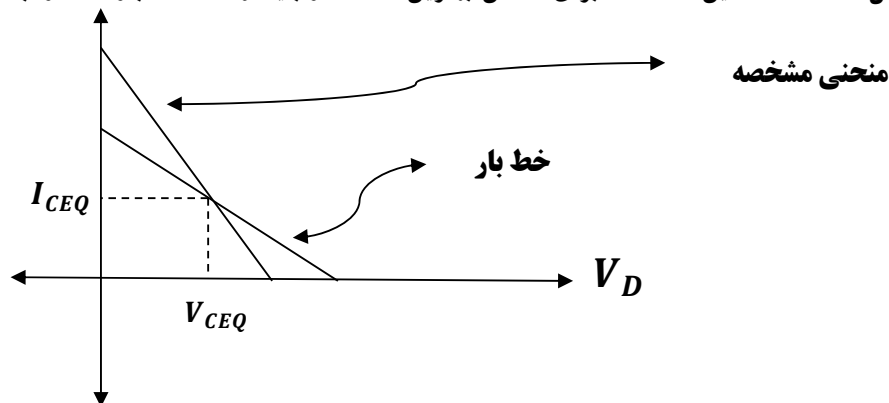
تعریف:

بهترین نقطه کار را که ماکزیمم نوسان خروجی را داشته باشیم را حداکثر سوئینگ متقارن یا بهترین نقطه کار و یا ماکزیمم نوسان متقارن گویند.

برای داشتن ماکزیمم نوسان متقارن در خروجی می بایست نقطه کار در وسط خط بار AC قرار بگیرد.

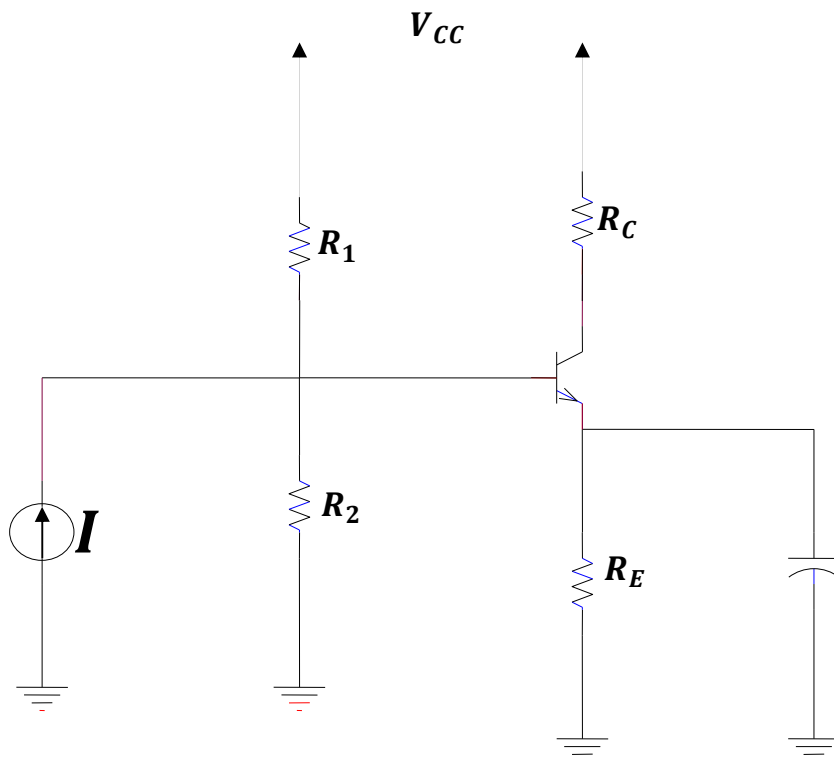
به شکل زیر توجه کنید:

این شکل نشان دهنده این است که برای داشتن بهترین نقطه کار باید وسط خط بار AC را به دست آورد.



✓ در مدار شکل زیر روش کلی یافتن بهترین نقطه کار را بیان می کنیم.

به مدار شکل زیر توجه کنید :



در تحلیل های DC , AC باید نکات زیر را رعایت کرد :

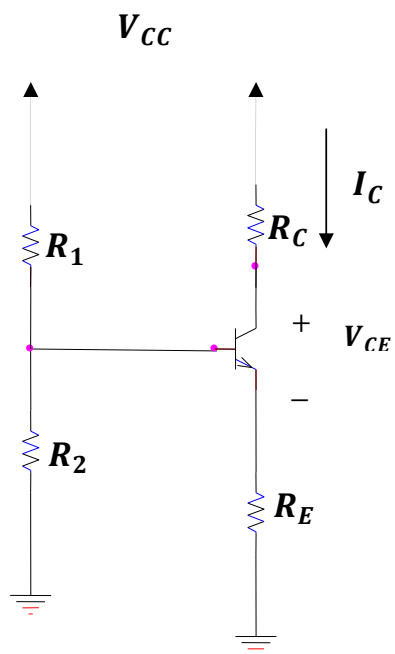
AC تحلیل :

- منابع DC خاموش
- خازنها اتصال کوتاه
- سلفها مدار باز

DC تحلیل :

- منابع AC خاموش
- سلفها اتصال کوتاه
- خازنها مدار باز

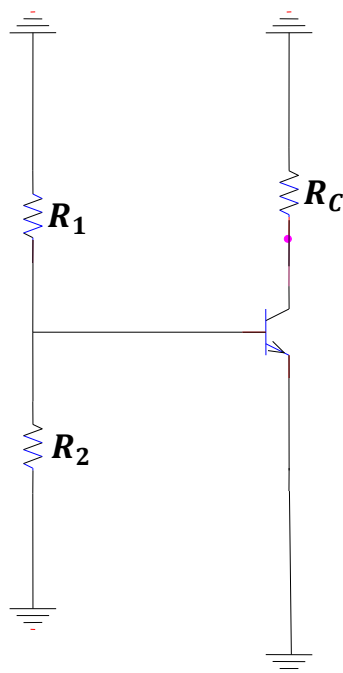
در زیر، شکل مدار را در حالت تحلیل DC رسم می کنیم :



معادله شماره ۱ $V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C$

$$R_C + R_E = R_{DC}$$

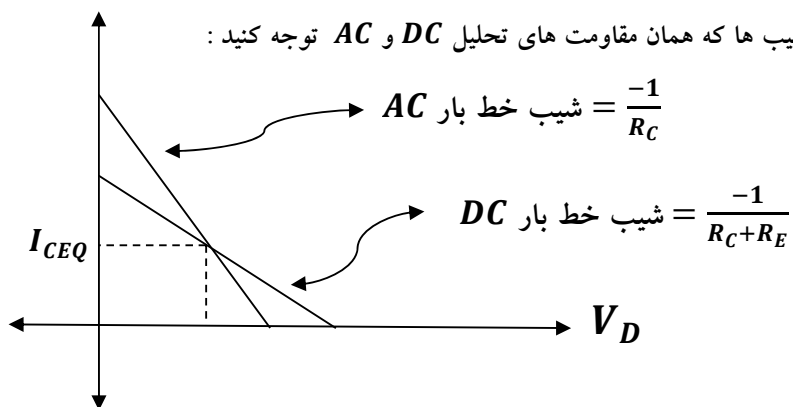
هم اکنون تحلیل AC را در مدار انجام می دهیم :



$$V_{ce} = -R_C I_C$$

$$R_{ac} = -R_C$$

در شکل زیر به شیب ها که همان مقاومت های تحلیل DC و AC توجه کنید :



$$V_{CEQ} \quad V_{ce} \quad V_{CC}$$

نکته :

از طریق معادله خط بار AC و معادله نقطه کار $Q(I_{CEQ}, V_{CEQ})$ و شیب $\frac{-1}{R_C}$ به معادله خط زیر می رسمیم :

$$\begin{cases} i_c - I_{CEQ} = \frac{-1}{R_C}(V_{CE} - V_{CEQ}) \\ i_c = 0 \end{cases} \Rightarrow V_{CEQ} = R_C I_C \quad \text{معادله شماره 2}$$

$$\Rightarrow V_{CE} = 2V_{CEQ}$$

هم اکنون به کمک معادلات شماره ۱ و ۲ خواهیم داشت :

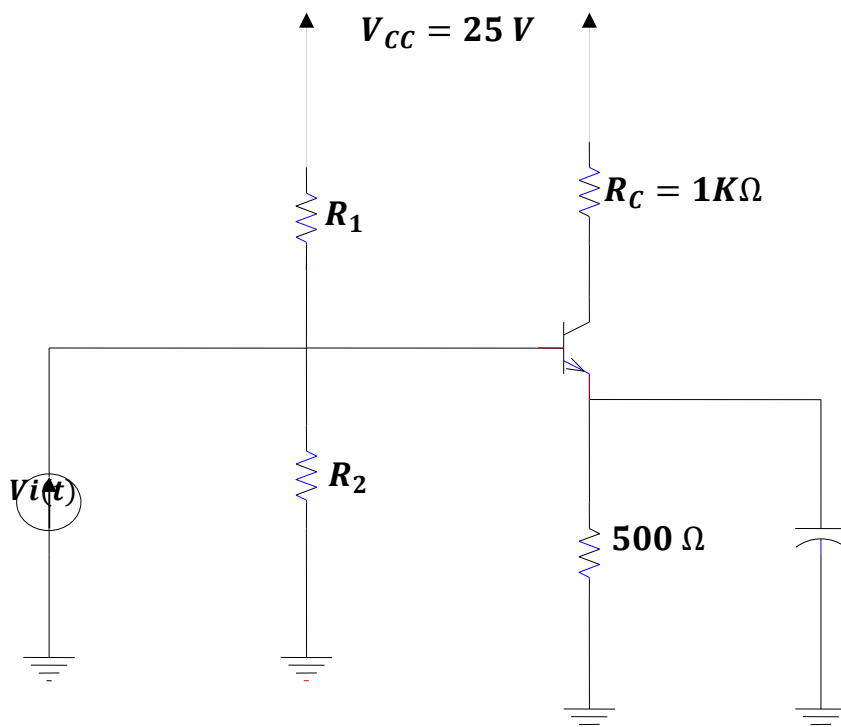
$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E + R_C} \Rightarrow V_{CEQ} = R_{ac} \times I_{CQ} \Rightarrow I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{DC} + R_{ac}}$$

نکات :

(۱) مقاومت سمت خروجی ترانزیستور که جریان I_C از آن عبور می کند در حالت ac را شیب خط بار AC گویند . (R_{ac})

(۲) مقاومت دیده شده از حلقه خروجی ترانزیستور که جریان I_C از آن عبور می کند در حالت DC را شیب خط بار DC گویند . (R_{DC})

مثال (۱) در مدار شکل زیر $100 < \beta < 200$ ، مقادیر R_1, R_2 را طوری تعیین کنید که ماکزیمم نوسان متقارن در خروجی رخ دهد ؟



حل : با توجه به توضیحاتی که بیان شد . برای حل مساله باید تحلیل DC و AC را انجام داد و مقاومت های مورد نظر را به دست آورد . بنابراین :

$$R_{ac} = R_C = 1\text{ K}\Omega \quad , \quad R_{DC} = R_C + R_E = 1 + 0.5 = 1.5\text{ K}\Omega$$

هم اکنون شرط بهترین نقطه کار را به صورت زیر اعمال می کنیم :

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{DC} + R_{ac}} = \frac{25}{1 + 1.5} = 10\text{ mA}$$

$$V_{CEQ} = R_{ac} \cdot I_{CQ} = 1 \times 10 = 10\text{ volt}$$

هم اکنون برای یافتن مجهولات مسئله احتیاج به نوشتن قانون kvl در ورودی و اعمال شرایط پایداری نقطه کار نسبت به تغییرات β داریم . بنابراین :

$$kvl \text{ in } 1 : V_B = 0.7 + 0.5I_{CQ} = 0.7 + 0.5 \times 10 = 5.7\text{ volt}$$

$$V_{BB} = V_B + R_B I_B = 6\text{ volt}$$

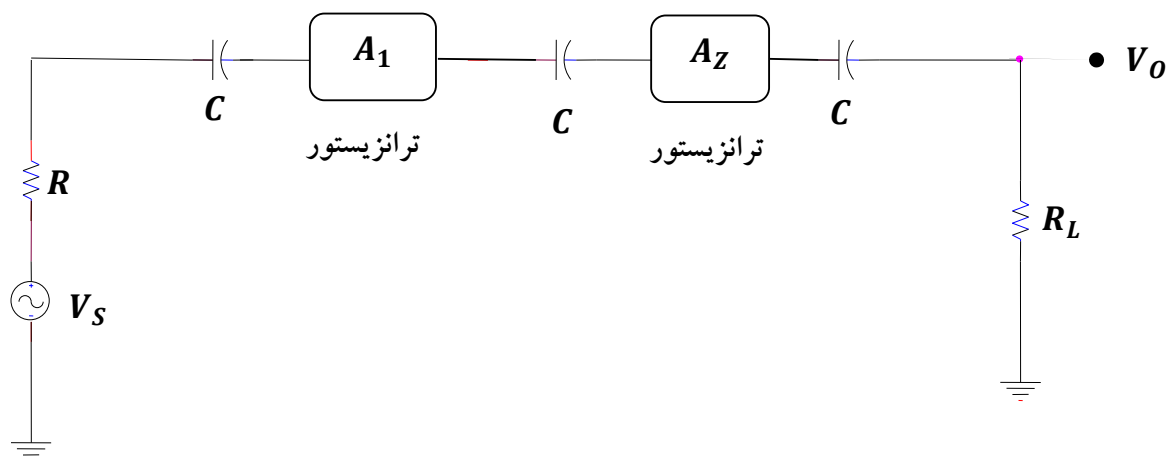
$$R_B = \frac{\beta_{min}}{10} R_E \Rightarrow R_B = \frac{100}{10} \times 0.5 = 5\text{ K}\Omega$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{ave}} = \frac{10}{150} = \frac{1}{15}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} R_1 = R_B \times \left(\frac{V_{CC}}{V_{BB}} \right) = 5 \times \frac{25}{6} = 20.8 \text{ K}\Omega \\ R_2 = R_B \times \left(\frac{1}{1 - \frac{V_{BB}}{V_{CC}}} \right) = 5 \times \frac{1}{1 - \frac{6}{25}} = 6.58 \text{ K}\Omega \end{cases}$$

✓ خازن کوپلاژ

به مدار شکل زیر توجه کنید :



نکات :

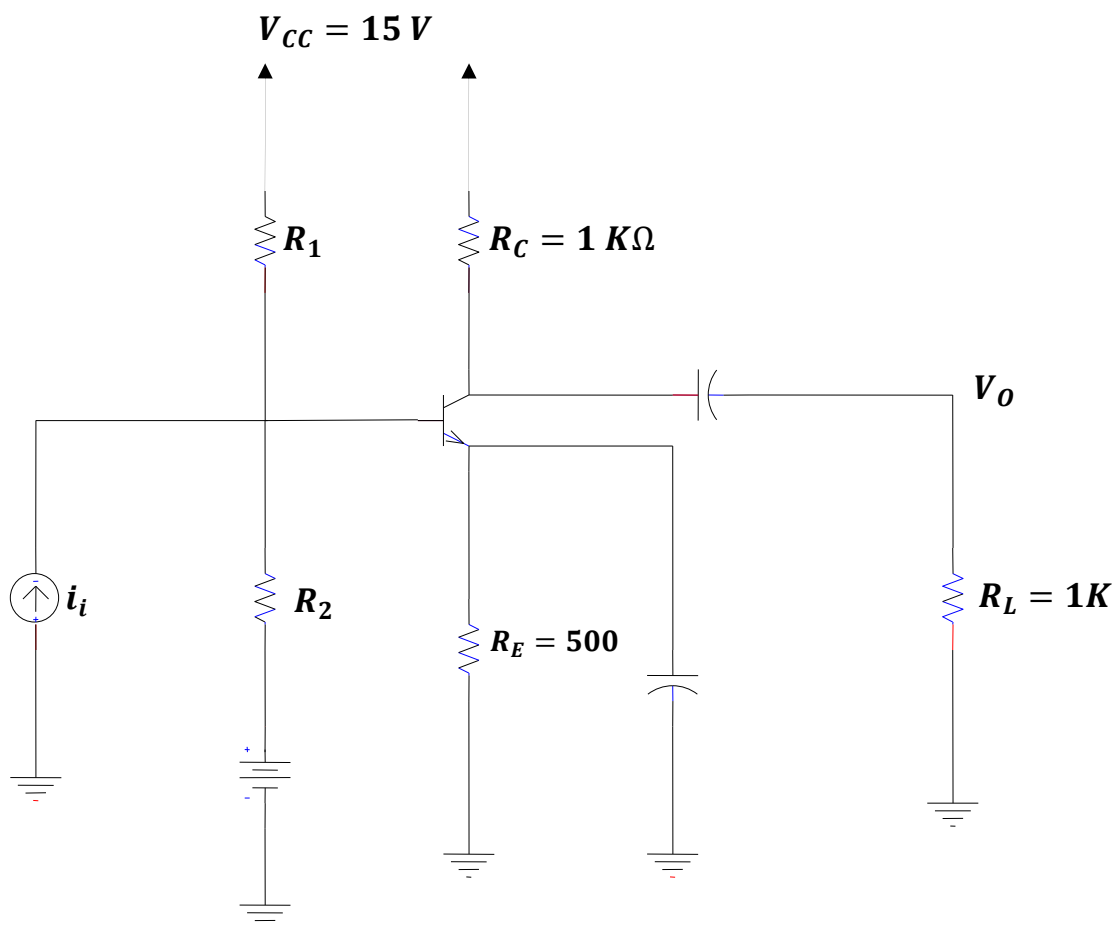
- ۱) اگر خازن سری با ترانزیستور باشد یعنی خازن کوپلاژ متصل است .
- ۲) اگر خازن با مقاومت موازی باشد در حالت تحلیل ac ، مقاومت را از بین می برد، به عبارت دیگر مقاومت را بایپس می کند .

کاربرد خازن کوپلاژ :

برای اتصال طبقات مختلف تقویت کننده چند طبقه ، اتصال منبع سیگنال به ورودی تقویت کننده و هم چنین برای اتصال مقاومت بار R_L ، به خروجی مدار از خازن کوپلاژ استفاده می شود .
(مثال) در مدار شکل زیر مطلوبست :

الف) تعیین نقطه کار برای ماکزیمم نوسان متقارن در خروجی

ب) اگر مقاومت R_E بایپس نشود آنگاه مقاومت های R_1, R_2 را طوری تعیین کنید که ماکزیمم دامنه متقارن در خروجی رخ دهد .



حل : ابتدا باید تحلیل DC و AC را انجام داد تا اینکه مقاومت های مربوط به آنها را پیدا نماییم و سپس به کمک شرایط بهترین نقطه کار حل مساله را به صورت زیر ادامه بدهیم :

$$AC \text{ تحلیل : } R_{AC} = R_L \parallel R_C = 1 \parallel 1 = 0.5 K\Omega$$

$$DC \text{ تحلیل : } R_{DC} = R_C + R_E = 1.5 K\Omega$$

$$\text{الف) } \begin{cases} I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{AC} + R_{DC}} = \frac{15}{2} = 7.5 \text{ mA} \\ V_{CEQ} = I_{CQ} \times R_{AC} = 7.5 \times 0.5 = 3.75 \text{ volt} \end{cases} \Rightarrow Q(7.5 \text{ mA}, 3.75 \text{ volt})$$

ب)

$$AC \text{ تحلیل : } R_{AC} = (R_L \parallel R_C) + R_E = 1 K\Omega$$

$$DC \text{ تحلیل : } R_{DC} = 1.5 K\Omega$$

$$V_{BB} = 0.7 + R_E I_E + R_B I_B = 4 \text{ volt}$$

$$R_B = \frac{\beta_{min}}{10} R_E = 5 \times 0.5 = 2.5$$

$$R_B = R_1 || R_2 = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_{BB} = V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} R_1 = R_B \times \left(\frac{V_{CC}}{V_{BB}} \right) = 9.4 \text{ K}\Omega \\ R_2 = R_B \times \left(\frac{1}{1 - \frac{V_{BB}}{V_{CC}}} \right) = 3.41 \text{ K}\Omega \end{cases}$$

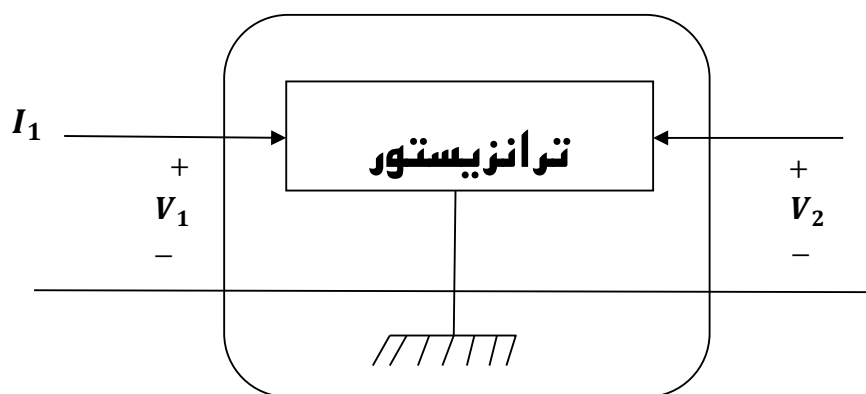
❖ فصل ششم

تقویت کننده های ترانزیستور در فرکانس های

پایین

مقدمه فصل :

ترانزیستورها ذاتاً یک المان غیر خطی هستند و منحنی مشخصه ورودی و خروجی غیر خطی دارند و در نتیجه اگر دامنه نوسان ورودی بزرگ باشد. (*Large Signal*) خروجی دارای اعوجاج غیر خطی خواهد بود. برای کاهش این اعوجاج بهتر است از سیگنال ولتاژ به جای سیگنال جریان در یک آمیتر مشترک استفاده شود، از طرف دیگر اگر هر دامنه نوسان سیگنال ورودی به اندازه کافی کوچک باشد می توان بخشی از منحنی مشخصه ورودی و خروجی را که نوسانات نقطه کار روی آنها اتفاق می افتد رابه صورت خطی تقریب زد. برای این منظور المان غیر خطی ترانزیستور را به صورت یک دو قطبی مدل می کنیم.



✓ انواع دو قطبی و مدل های آن :

- ۱) مدل امپدانس (Z)
- ۲) مدل ادمیتانس (Y)
- ۳) مدل هایبرید (H)
- ۴) مدل هایبرید (π)
- ۵) مدل هایبرید (G)

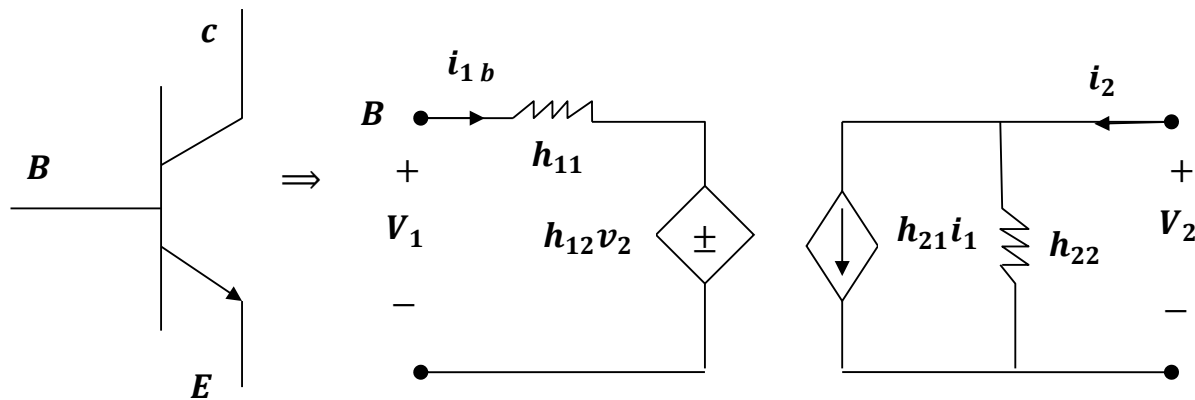
✓ معرفی مدل هایبرید (H)

Hybrid – H

$$\begin{cases} V_1 = h_{11}i_1 + h_{12}V_2 \\ i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}v_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$$

$$h_{11} = \frac{V_1}{i_1} \quad (V_2 = 0) \quad \& \quad h_{12} = \frac{V_1}{V_2} \quad (i_1 = 0)$$

$$h_{21} = \frac{i_2}{i_1} \quad (V_2 = 0) \quad \& \quad h_{22} = \frac{i_2}{V_2} \quad (i_1 = 0)$$



توضیح : در یک مدار خطی ورودی ترانزیستور که در حالت سیگنال کوچک قرار دارد از مدل های اشاره شده، مدل هایبرید H ، بهترین مدل برای تحلیل دادن ترانزیستور در سیگنال کوچک خواهد بود که ضرایب آنها به صورت زیر نام گذاری می شوند .

$$h_{11} \triangleq h_i \quad \& \quad h_{12} \triangleq h_r \quad \& \quad h_{21} \triangleq h_f \quad \& \quad h_{22} \triangleq h_o$$

$$h_{ie}, h_{re}, h_{fe}, h_{oe} \Rightarrow CE \Rightarrow \text{امیتر مشترک}$$

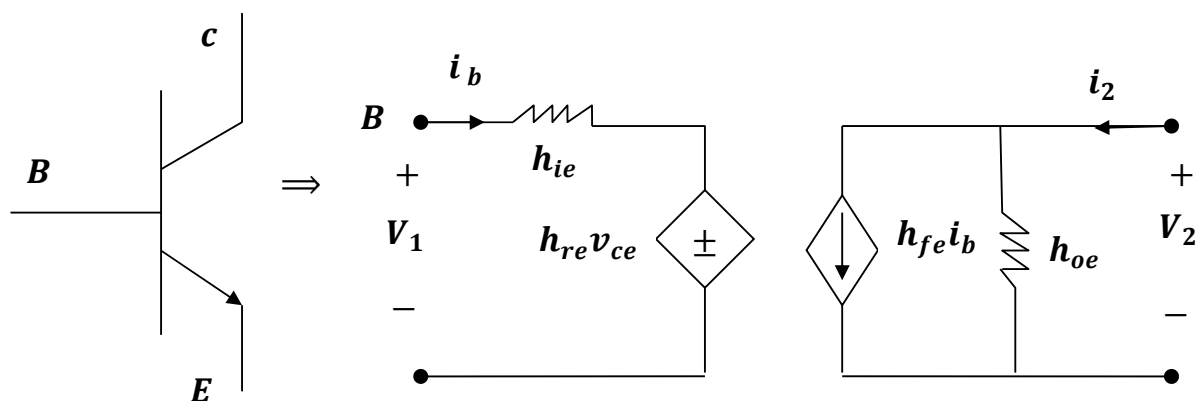
$$h_{ib}, h_{rb}, h_{fb}, h_{ob} \Rightarrow CB \Rightarrow \text{بیس مشترک}$$

$$h_{ic}, h_{rc}, h_{fc}, h_{oc} \Rightarrow CC \Rightarrow \text{کلکتور مشترک}$$

توضیح :

در کاتولوگ ها ، معمولاً اطلاعات ستون دوم داده می شود و ما بقی می بایست محاسبه شود .

✓ نحوه محاسبه پارامتری هایبرید H برای مدار آمیتر مشترک



محاسبه h_{ie} :

$$h_{ie} = \left(\frac{\partial i_B}{\partial V_{BE}} \right)^{-1} \Big|_{v_{ce}}$$

$$\left(h_{ie} = \frac{\eta V_T}{I_{BQ}} , \quad I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} \right) \Rightarrow h_{ie} = \frac{\eta \beta V_T}{I_{CQ}}$$

توضیح :

قبل از محاسبه سیگنال کوچک (منظور محاسبه h_{ie})، نیاز به تحلیل DC و به دست آوردن I_{CQ} داریم، با محاسبه جریان نقطه کار و مقادیر ثابت $\eta \beta V_T$ که غالباً جزء مفروضات مسئله است h_{ie} را محاسبه نموده و در تحلیل سیگنال کوچک از آن استفاده می کنیم.

محاسبه h_{re} :

$$h_{re} = \left(\frac{\partial V_{BE}}{\partial V_{CE}} \right) \Big|_{I_{BQ}} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}} \Big|_{I_{BQ}} = \text{مقدار کوچکی}$$

محاسبه h_{fe} :

$$h_{fe} = \left(\frac{\partial i_c}{\partial i_b} \right) \Big|_{V_{CEQ}} \cong \beta \Rightarrow h_{fe} = \beta$$

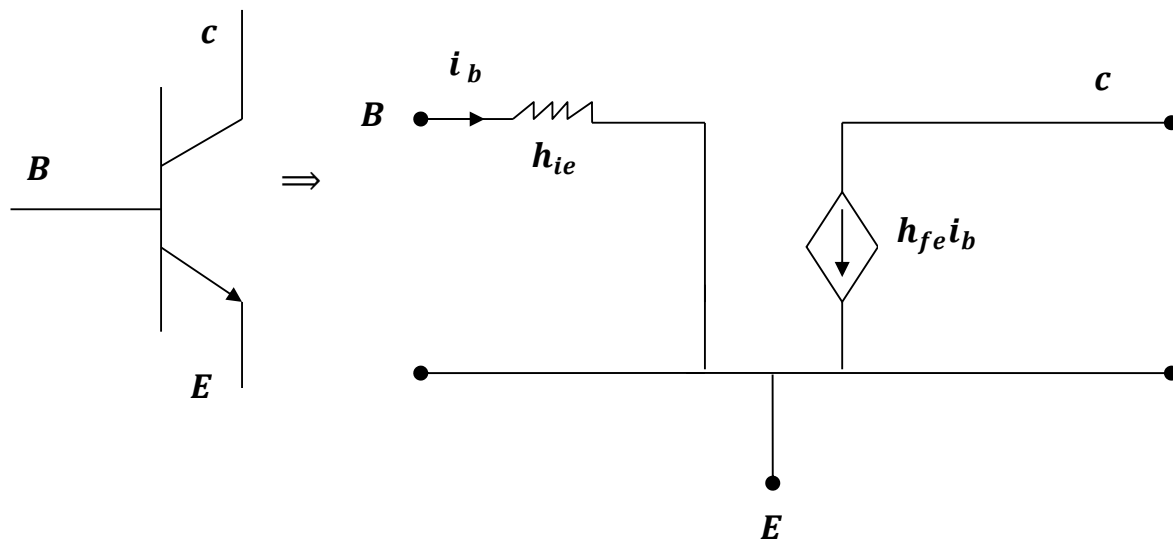
محاسبه h_{oe} :

$$h_{oe} = \left(\frac{\partial i_c}{\partial V_{CE}} \right) \Big|_{I_{BQ}} \cong h_{oe} = 0 \Omega^{-1} \Rightarrow h_{oe}^{-1} = \infty \Omega$$

تذکر : مقادیر فوق در این رنج ها می باشند :

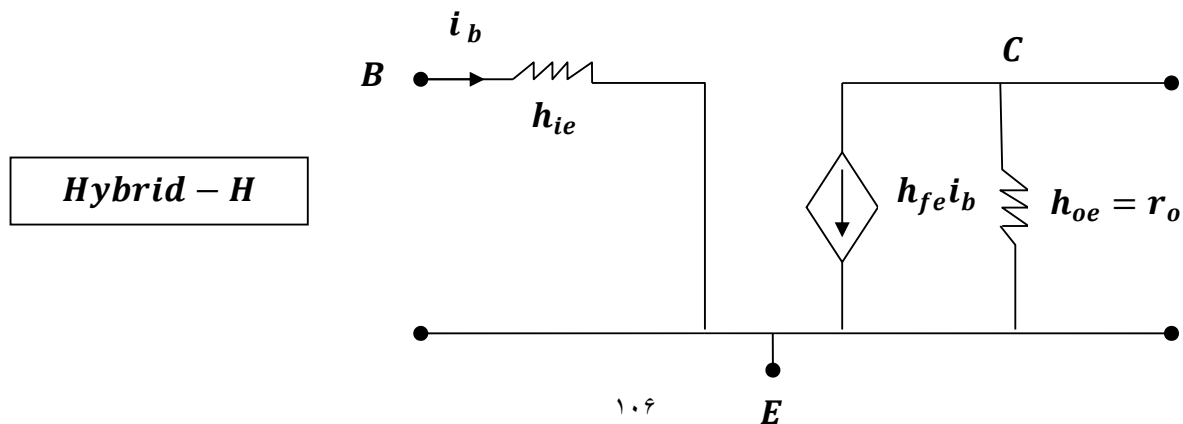
$$\left\{ \begin{array}{l} h_{ie} = 1.1 \text{ k}\Omega \\ h_{re} = 2.5 \times 10^{-4} \\ h_{fe} = 50 \\ h_{oe} = 25 \times 10^{-6} \Omega^{-1} \text{ or} \\ h_{oe}^{-1} = 40 \text{ k}\Omega \end{array} \right.$$

بنابراین ساده شده مدل به صورت زیر خواهد بود :

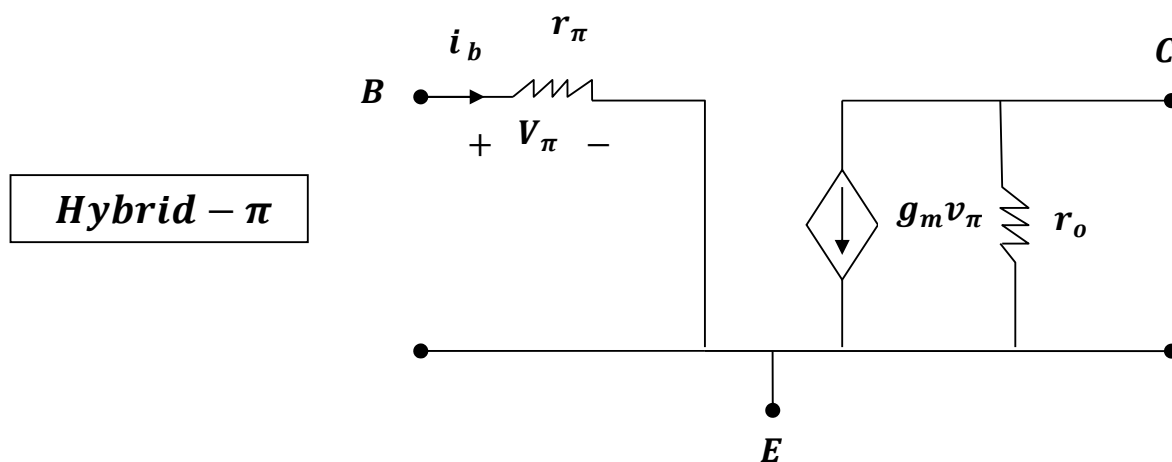


✓ مقایسه دو مدل $Hybrid - H$ و $Hybrid - \pi$:

به مدل هایبرید $Hybrid - H$ اچ و هم چنین به مدل هایبرید پی $Hybrid - \pi$ توجه کنید :



مدل $Hybrid - \pi$:



$$r_{\pi} = h_{ie} \quad \& \quad r_o = h_{oe}^{-1} \Rightarrow g_m V_{\pi} = h_{fe} i_b \Rightarrow i_b = \frac{V_{\pi}}{r_{\pi}} \Rightarrow$$

$$g_m V_{\pi} = h_{fe} \left(\frac{V_{\pi}}{r_{\pi}} \right) = h_{fe} \left(\frac{V_{\pi}}{h_{ie}} \right) \Rightarrow$$

$$g_m = \frac{h_{fe}}{h_{ie}} \Rightarrow g_m = \frac{\beta}{h_{ie}}$$

$$g_m = \frac{\beta}{h_{ie}} = \frac{\beta}{\frac{\eta \beta V_T}{I_{CQ}}} = \frac{I_{CQ}}{\eta V_T} \text{ (if } V_T = 25m) = 40 I_{CQ}$$

➤ روش حل مدارها در حالت کلی : ابتدا مدار آمیتر مشترک در سیگنال کوچک :

برای حل مدارهای دارای ورودی AC ، چهار مرحله زیر را معرفی خواهیم کرد.
 مرحله اول : ابتدا به منظور محاسبه h_{ie} ، جریان نقطه کار CQ از تحلیل DC به دست آورده و h_{ie} را طبق فرمول هایی که در بالا گفته شده محاسبه می کنیم.
 مرحله دوم : در این مرحله مدار AC را ترسیم می کنیم. برای رسم مدار AC ، باید خازنها اتصال کوتاه و منابع DC خاموش باشند.

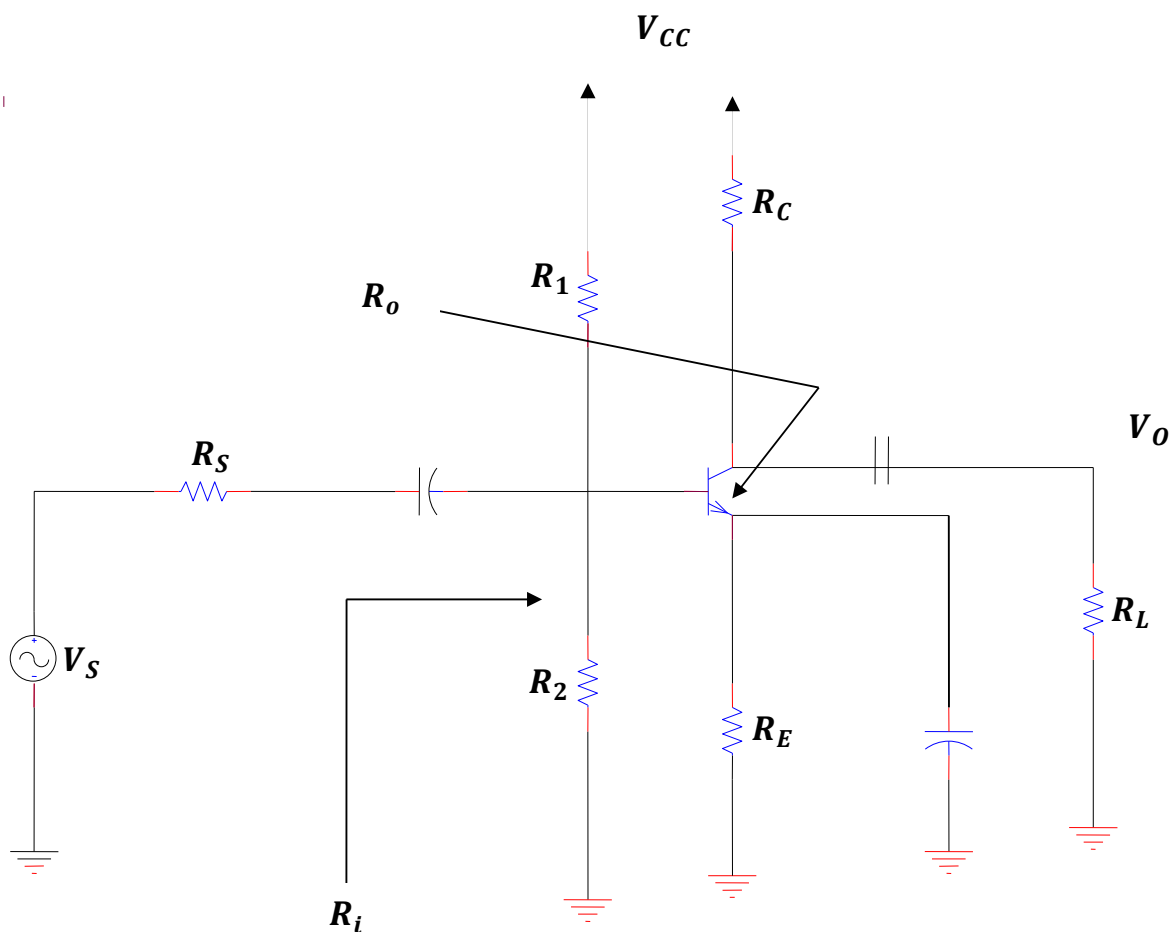
مرحله سوم : مدل هایبیرید H را جایگزین ترانزیستور کرده و یک مدار LIT به دست می آوریم.

مرحله چهارم : با انتخاب روش های تجزیه و تحلیل مداری (گره و یا مش) مدار LIT را حل کرده و پارامترهای سیگنال کوچک را به دست می آوریم .
مثال ۱) در مدار شکل زیر مطلوبست :

الف) گین ($Gain$) جریان (بهره جریان) $A_i = \frac{i_o}{i_i}$

ب) گین ($Gain$) ولتاژ (بهره ولتاژ) $A_v = \frac{v_o}{v_i}$

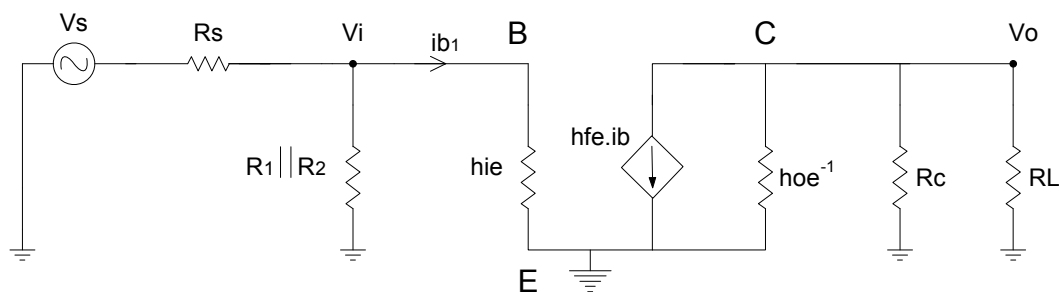
ج) مقاومت ورودی و مقاومت خروجی



حل : در این مثال به حل کلی مسائل مشابه مدار فوق خواهیم پرداخت .

تمرین : تحلیل DC به عهده دانشجو می باشد .

بعد از اینکه تحلیل DC را انجام دادیم و مقدار h_{ie} را به دست آوردیم . در تحلیل ac باید مدل هایبیرید H را به صورت زیر جایگزین ترانزیستور کنیم . به مدار زیر توجه کنید :



حل : الف و ب)

$$A_V = \frac{V_O}{V_i} \Rightarrow \begin{cases} V_O = (R_L || R_C || r_o) i_O \\ i_O = -h_{fe} i_b \end{cases} \Rightarrow V_O = -(R_L || R_C || r_o) h_{fe} i_b \quad \text{رابطه شماره 1}$$

$$V_i = h_{ie} i_b \quad \text{رابطه شماره 2} \Rightarrow$$

به کمک رابطه های شماره ۱ و ۲ خواهیم داشت :

$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{-(R_L || R_C || r_o) h_{fe} i_b}{h_{ie} i_b} = - \frac{(R_L || R_C || r_o) h_{fe}}{h_{ie}}$$

$$g_m = \frac{h_{fe}}{h_{ie}} \Rightarrow A_V = -g_m \times (R_L || R_C || r_o)$$

رابطه فوق یک رابطه کلی برای حالتی می باشد که در امیتر مقاومتی نداشته باشیم . در زیر نکته ای برای تست جواب ارائه می گردد به آن توجه کنید :

$$A_V = \frac{-g_m \left(\text{مقاومت های کلکتور} \right)}{1 + g_m \left(\text{مقاومت های امیتر} \right)} \quad , A_V < 0 \quad , |A_V| > 1$$

$$A_i = \frac{i_O}{i_i} \Rightarrow \begin{cases} i_b = i_i \times \frac{R_1 || R_2}{h_{ie} + R_1 || R_2} \quad \text{قاعده تقسیم جریان} \\ i_O = -h_{fe} i_b \end{cases} \Rightarrow$$

$$i_O = -h_{fe} \times i_i \times \frac{R_1 || R_2}{h_{ie} + R_1 || R_2} \Rightarrow A_i = \frac{i_O}{i_i} = -h_{fe} \times \frac{R_1 || R_2}{h_{ie} + R_1 || R_2}$$

حل ج)

$$R_i = \frac{V_i}{i_i} = R_1 || R_2 || h_{ie} = \frac{R_1 || R_2 \times h_{ie}}{h_{ie} + (R_1 || R_2)}$$

نکته : برای محاسبه مقاومت خروجی R_O ، ابتدا منابع مستقل AC را خاموش کرده ، R_L را برابر با ∞ قرار می دهیم و به جای مقاومت بار از یک منبع V_x با جریان I_x استفاده می کنیم و با محاسبه نسبت این دو مقاومت خروجی را محاسبه می کنیم .

$$R_O = \frac{V_x}{i_x} \quad \left(\text{منابع مستقل خاموش} \right) = \frac{V_x}{0} = \infty$$

$$\begin{cases} i_x = h_{fe} i_b \\ i_b = 0 \end{cases} \Rightarrow i_x = 0$$

نکته :

$$R_O = \frac{V_x}{i_x} \quad \left(h_{oe}^{-1} \text{ در صورت وجود} \right) = \infty \quad || \quad h_{oe}^{-1} = h_{oe}^{-1}$$

در مثال فوق داریم :

$$R_C = 1 \text{ K}\Omega , \quad h_{fe} = 50 , \quad h_{oe}^{-1} = 40 \text{ k}\Omega , \quad h_{ie} = 101 \text{ k}\Omega , \quad h_{re} = 2.5 \times 10^{-4}$$

$$A_V \left(\text{دقیق} \right) = -46 , \quad A_V \left(\text{تقریبی} \right) = -45.5$$

نکته : به فرمول روبرو توجه کنید :

$$A_{V_S} = \frac{V_O}{V_S} = \frac{V_O}{V_i} \times \frac{V_i}{V_S}$$

تمرین : درستی رابطه فوق را تحقیق کرده و از آن نتیجه زیر را برداشت کنید .

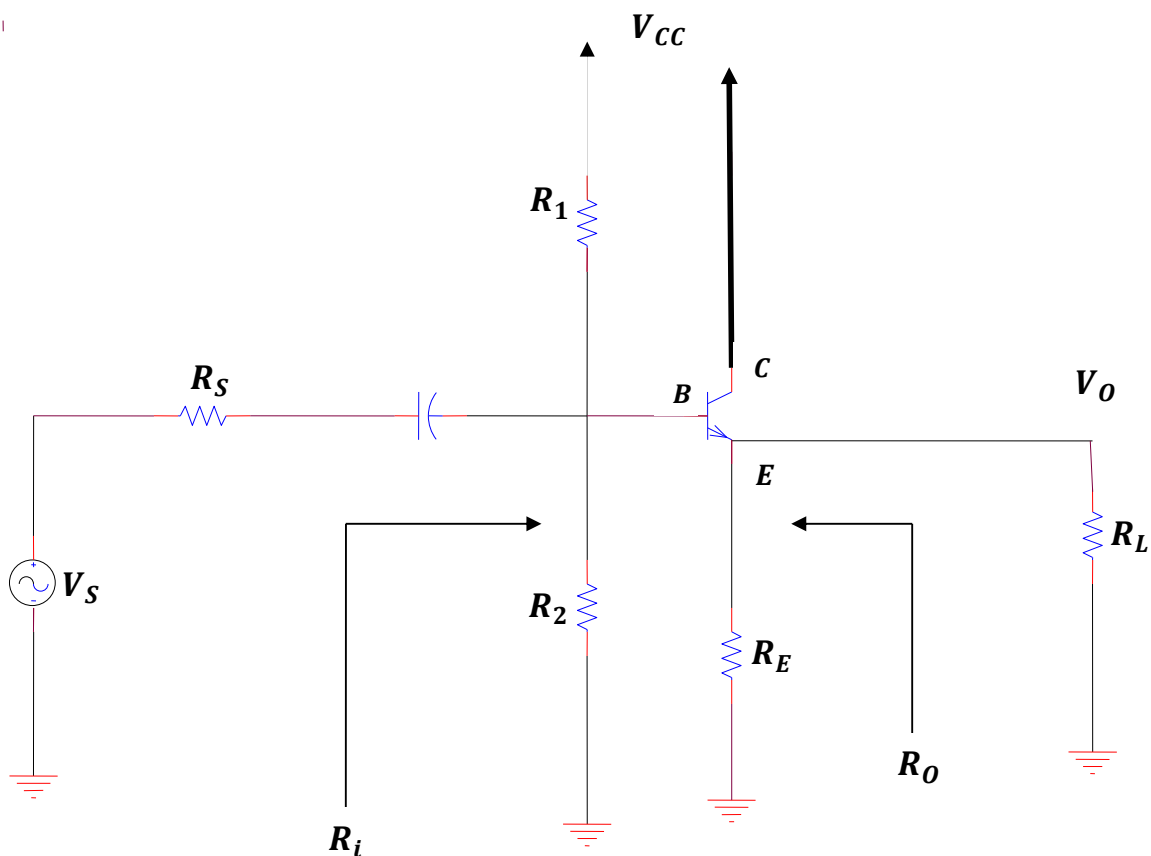
$$A_{V_S} = \frac{V_O}{V_i} \times \frac{R_i}{R_S + R_i}$$

✓ مدار کلکتور مشترک در حالت سیگنال کوچک و نحوه حل آن :

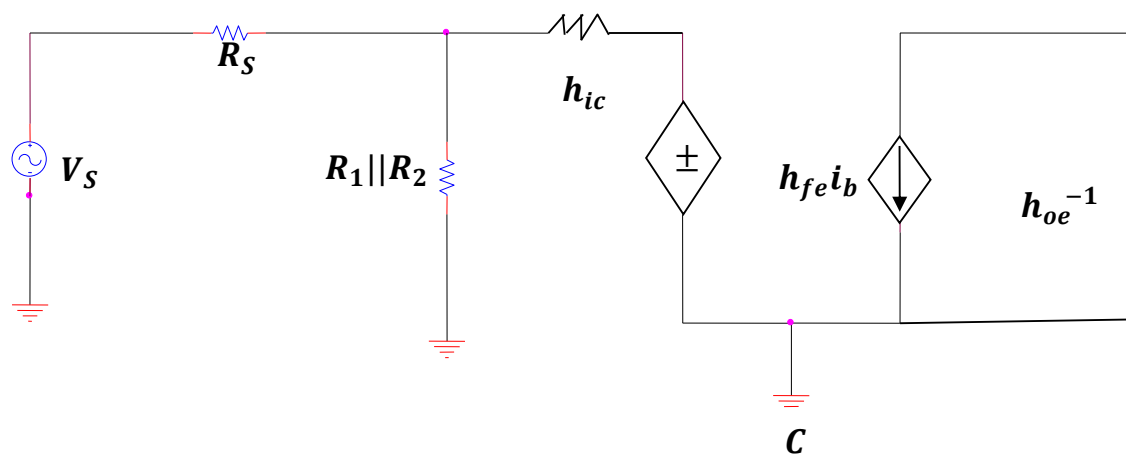
در این مدار هم به دنبال محاسبه بهره ولتاژ ، بهره جریان و هم چنین مقاومت خروجی و مقاومت ورودی هستیم . برای این امر بهترین مدلی را که استفاده خواهیم کرد مدل تقریبی هایبرید H می باشد . البته قبل از بیان این مدل در مدار کلکتور مشترک به ارائه مدارهایی در زیر می پردازیم که به مراتب فراگیری دشوارتر از مدل تقریبی هایبرید H دارند .

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} \quad \& \quad A_v = \frac{V_o}{V_i} \quad \& \quad R_i \quad \& \quad R_O \quad \text{????}$$

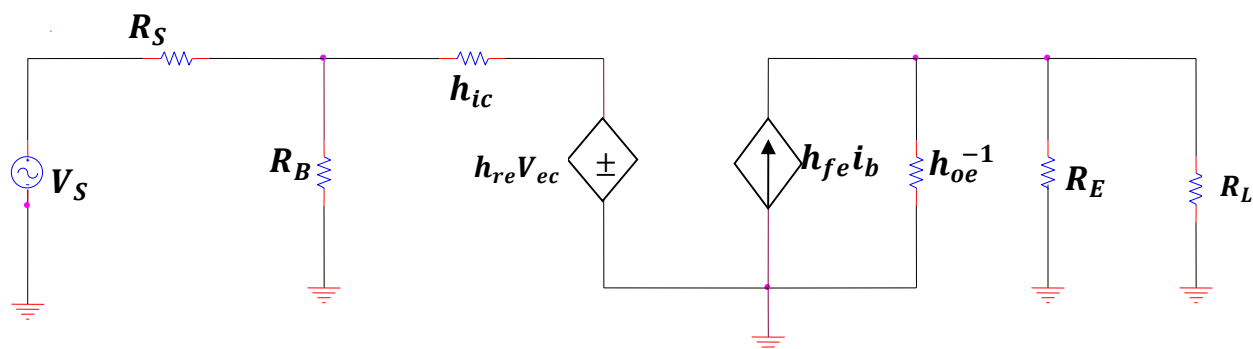
در زیر مدار کلکتور مشترک را برای شما ارائه می کنیم :



در زیر به مدار فوق در حالت تحلیل AC و هم چنین به مدار جایگزین ترانزیستور می پردازیم:



در مدار آمده در زیر مدار LIT را برای شما می آوریم . که به کمک مدار آمده در زیر می توانیم مجهولات مربوط به سیگنال کوچک در حالت تحلیل AC را به دست آوریم .



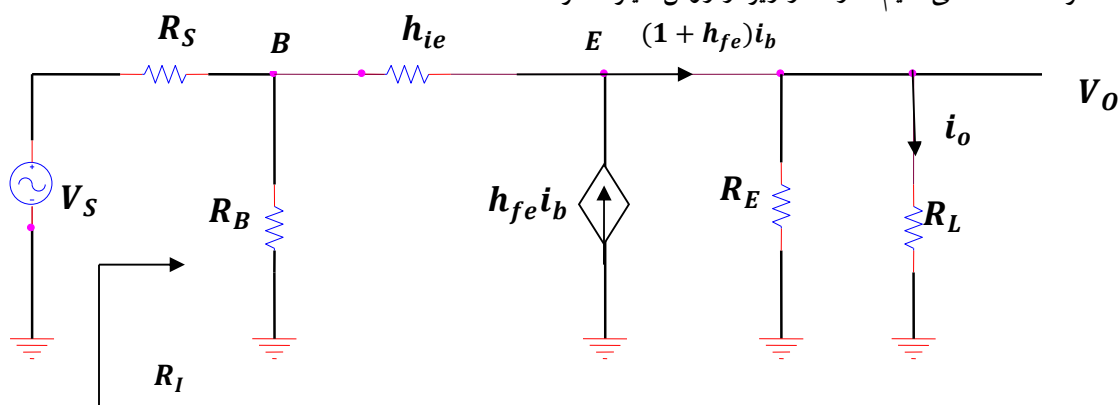
در مسئله اطلاعات زیر را داریم :

$$h_{ie} - h_{fe} - h_{re} - h_{oe}^{-1}$$

تذکر : رابطه های زیر باید حفظ شوند .

$$h_{ic} = h_{ie} \quad \& \quad h_{fc} = -(1 + h_{fe}) \quad \& \quad h_{rc} = 1 - h_{re} \quad \& \quad h_{oc} = h_{oe}$$

تذکر مهم : برای اینکه در مدارهای کلکتور مشترک در صفحات قبل را حفظ نکنیم از روش امیتر مشترک استفاده می کنیم . در مدار زیر از روش امیتر مشترک استفاده شده است .



$$A_V = \frac{V_o}{V_i} \Rightarrow$$

$$V_o = (1 + h_{fe})i_b \times (R_E \parallel R_L) \quad \& \quad V_i = i_b h_{ie} + (1 + h_{fe})i_b \times (R_E \parallel R_L)$$

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{(1 + h_{fe})i_b \times (R_E \parallel R_L)}{i_b h_{ie} + (1 + h_{fe})i_b \times (R_E \parallel R_L)} \Rightarrow \text{صورت و مخروج را تقسیم بر } h_{ie} \text{ می کنیم} \Rightarrow$$

$$\pi \text{ مدل هایبرید : } g_m = \frac{h_{fe}}{h_{ie}} \Rightarrow A_V = \frac{g_m \times (R_E \parallel R_L)}{1 + g_m(R_E \parallel R_L)}$$

نکته : بیان رابطه کلی برای مدار کلکتور مشترک :

$$A_V = \frac{g_m \times (\text{مقاومت های امیتر})}{1 + g_m(\text{مقاومت های امیتر})} < 1 \quad \& \quad \cong 1$$

تذکر: از رابطه فوق فقط برای سوالات تستی و هم چنین تست جواب می توان استفاده کرد .
 در سوالات تشریحی نمی توان فقط به جواب ناشی از این فرمول بسنده کرد .
 نکته : یادآوری قضیه انعکاس : مقاومت های امیتر اگر بروند به بیس در $(1 + \beta)$ ضرب می شوند .

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} \Rightarrow \begin{cases} i_o = (1 + h_{fe})i_b \times \frac{R_E}{R_E + R_L} \\ i_b = i_i \times \frac{R_B}{R_B + [h_{ie} + (1 + h_{fe})(R_E || R_L)]} \end{cases} \Rightarrow$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{(1 + h_{fe})R_E}{R_E + R_L} \times \frac{R_B}{R_B + [h_{ie} + (1 + h_{fe})(R_E || R_L)]}$$

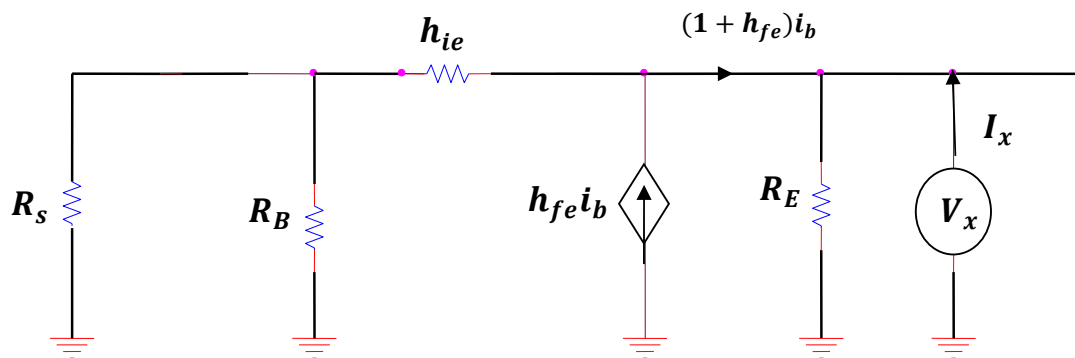
محاسبه مقاومت های ورودی و خروجی :

$$R_i = \frac{V_i}{i_i} = R_B || [h_{ie} + (1 + h_{fe})(R_E || R_L)]$$

تذکر : به کاربرد قضیه انعکاس در رابطه فوق توجه کنید .

محاسبه مقاومت خروجی :

برای محاسبه مقاومت خروجی به مدار زیر توجه کنید :



$$R_o = \frac{V_x}{I_x} \Rightarrow kcl : I_x = \frac{V_x}{R_E} - (1 + h_{fe})i_b, \quad V_x = -i_b \times [h_{ie} + (R_B || R_S)]$$

$$R_o = \frac{V_x}{I_x} = \frac{[h_{ie} + (R_B || R_S)] \times R_E}{[h_{ie} + (R_B || R_S)] + (1 + h_{fe})R_E}$$

* خصوصیات یک مدار کلکتور مشترک :

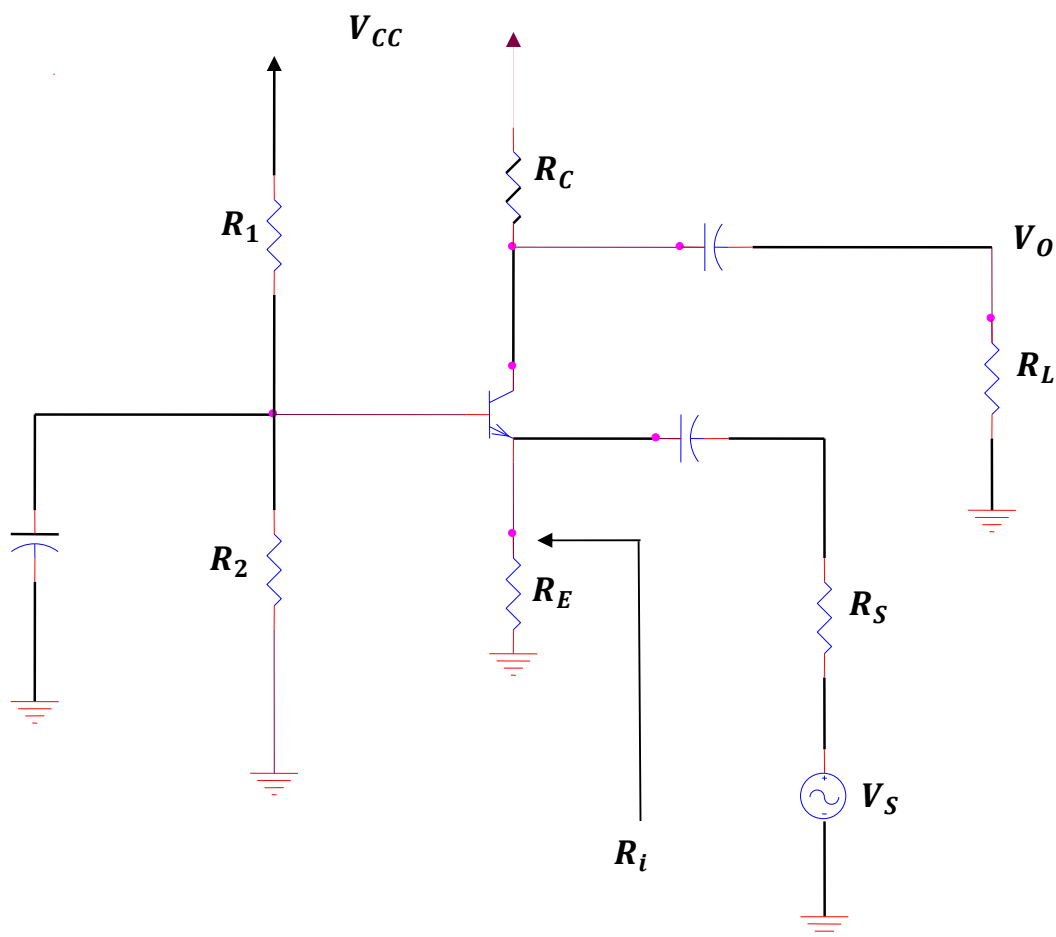
(۱) گین ولتاژ حدوداً مساوی با یک می باشد : $A_V \approx 1$

(۲) مقاومت ورودی بزرگ می باشد . $R_i = Large$

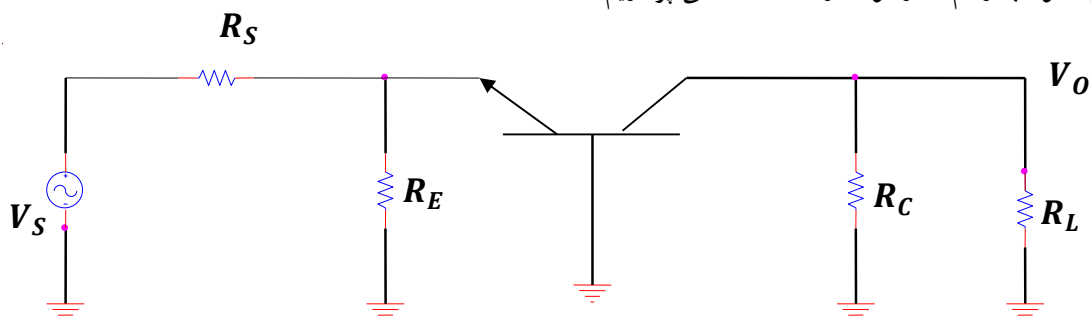
(۳) مقاومت خروجی کوچک می باشد . $R_o = small$

معمولا کلکتور مشترک را به عنوان بافر در مدارات استفاده می کنند . که بافر مداری است که بین منبع سیگنال با مقاومت داخلی بسیار بزرگ و یک مقاومت بار بسیار کوچک استفاده می گردد. هم چنین بافر را می توان بین دو تقویت کننده با امپدانس های ورودی و خروجی متفاوت قرار داد تا اینکه حداکثر توان ورودی به خروجی انتقال یابد .

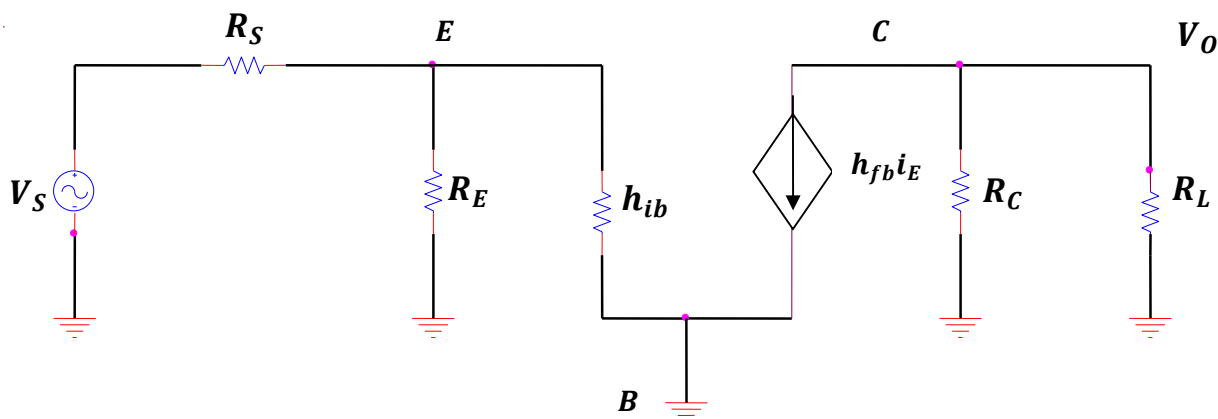
✓ مدار تقویت کننده بیس مشترک *CB : Command Base*



هم اکنون به رسم مدار فوق در حالت *ac* می پردازیم :

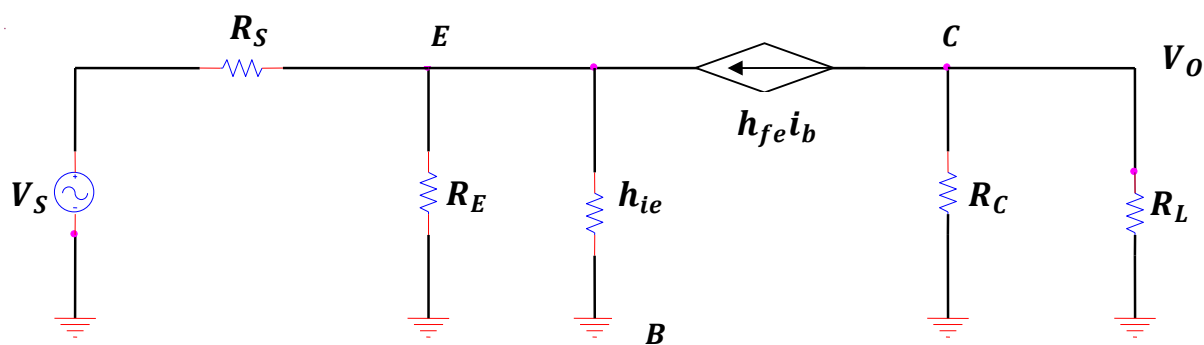


در مدار زیر مدل بیس مشترک را برای شما آورده ایم. که باید از روابط زیر تبعیت نماید :



$$h_{ib} = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}, \quad h_{rb} = 0$$

هم اکنون به کمک مدل تقریبی هایبرید h و به کمک مدار آمیتر مشترک مدار زیر را برای سیگنال کوچک خواهیم داشت و می توانیم مجهولات مورد نظر را به دست آورد .
مدل سیگنال کوچک هایبرید H به کمک CE در مدار فوق :



$$A_V = \frac{V_O}{V_i} \Rightarrow \begin{cases} V_O = -h_{fe} i_b \times (R_C || R_L) \\ V_i = -i_b \times h_{ie} \end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{h_{fe}}{h_{ie}} \times (R_C || R_L) \\ g_m = \frac{h_{fe}}{h_{ie}} \end{cases} \Rightarrow A_V = g_m \times (R_C || R_L)$$

✓ مقایسه تقویت کننده های امیتر مشترک ، بیس مشترک و کلکتور مشترک :

به جدول زیر توجه کنید :

نوع تقویت کننده	$ A_V $	$ A_I $	R_i	R_o
CB	> 1	< 1	کم	زیاد
CC	< 1	> 1	زیاد	کم
CE	> 1	> 1	متوسط	متوسط

توضیح :

مدار بیس مشترک درست برعکس کلکتور مشترک می باشد . و از آن برای تطبیق امپدانس بین منبع سیگنال با مقاومت داخلی بسیار کوچک و ورودی تقویت کننده استفاده می گردد که پهنای باند زیاد این مدار موجب استفاده زیاد آن در مدارات Rf شده است .

* مدار بافر :

بافر یک نوع تطبیق امپدانس می باشد .

(۱) مدار کلکتور مشترک

(۲) روش بوت استروپ : قضیه میلر

(۳) زوج دار لیگتون

(۴) بوت استروپ + زوج دار لیگتون

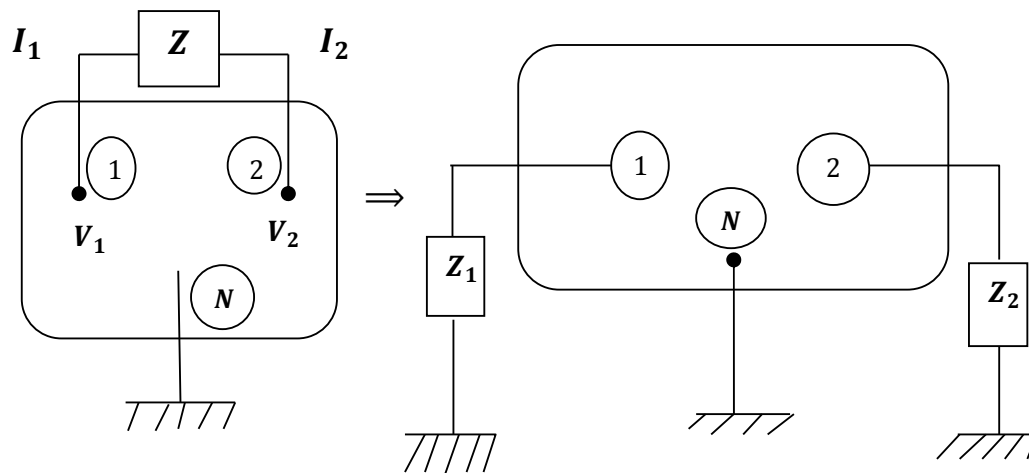
شرایط مدار بافر :

$$\begin{cases} A_V \approx 1 \\ R_i \approx \infty \\ R_o = 0 \end{cases}$$

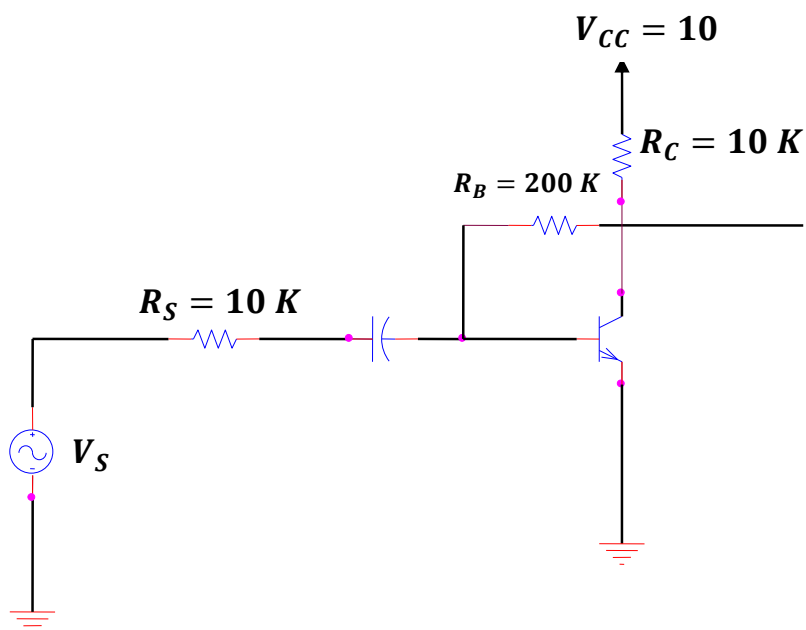
قضیه میلر :

توضیح : اگر در یک مدار فشرده دارای n گره (گره n مشترک) بین دو گره دلخواه مثلا ۱ و ۲ امپدانس Z وجود داشته باشد ، می توان این امپدانس را باز نموده و از گره های ۱ و ۲ امپدانس های Z_1 , Z_2 را به گره مشترک مدار (گره n ام) متصل شود ، به شرط آنکه $k = A_V = \frac{V_2}{V_1}$ در این Z_1 , Z_2 به طریق زیر به دست می آیند .
به روابط حاکم بر قضیه میلر توجه کنید :

$$\text{قضیه میلر : } \begin{cases} K = A_V = \frac{V_2}{V_1} \\ Z_1 = \frac{Z}{1-K} = \frac{Z}{1-A_V} \\ Z_2 = \frac{Z \times K}{K-1} = \frac{Z \times A_V}{A_V-1} \end{cases}$$



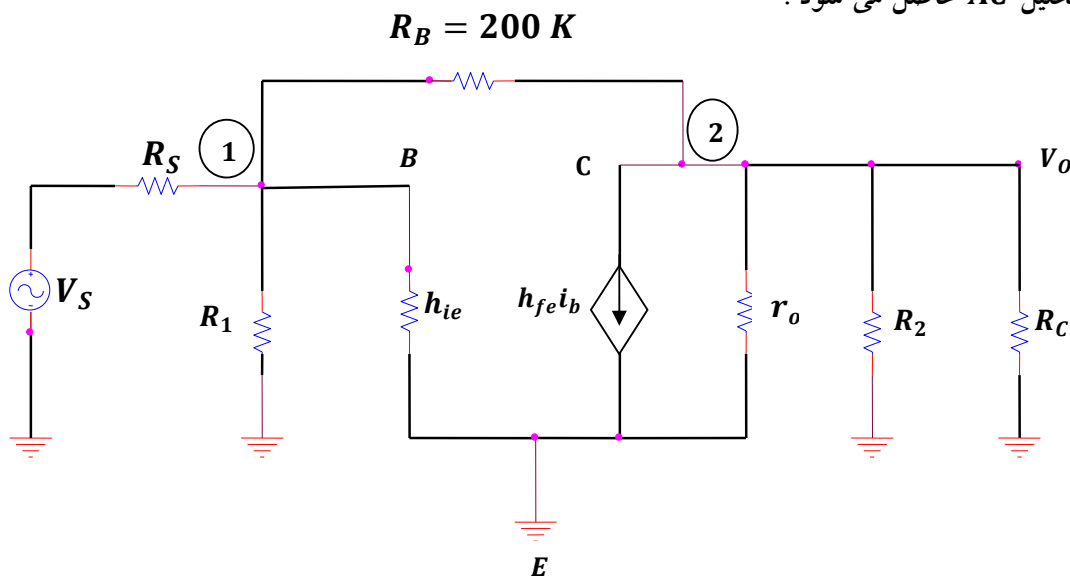
مثال (در مدار شکل زیر بهره ولتاژ و مقاومت ورودی را به دست آورید .



مفروضات مسئله :

$$h_{ie} = 1.5 \text{ k}\Omega, \quad h_{fe} = 100, \quad h_{oe}^{-1} = 40 \text{ k}\Omega = r_o$$

حل : با توجه به اینکه مقدار h_{ie} جزء مفروضات مسئله می باشد . دیگر احتیاجی به تحلیل DC نداریم . با توجه به توضیحاتی که در رابطه با قضیه میلر گفته شد . مدار زیر در تحلیل AC حاصل می شود .



$$K = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_O}{V_i} = A_{Vi}$$

$$R_1 = \frac{R_B}{1 - A_{Vi}} \quad \& \quad R_2 = \frac{R_B \times A_{Vi}}{A_{Vi} - 1}$$

$$A_{Vi} = \frac{V_O}{V_i} \Rightarrow \begin{cases} V_O = -h_{fe}i_b \times [R_C \parallel R_2 \parallel h_{oe}^{-1}] \\ v_i = i_b \times h_{ie} \end{cases} \Rightarrow$$

$$A_{Vi} = -g_m \times [R_C \parallel R_2 \parallel h_{oe}^{-1}] = \frac{-g_m \left(\text{مقاومت های کلکتور} \right)}{1 + g_m \left(\text{مقاومت های امیتر} \right)}$$

در روابط بالا R_2 , A_{Vi} مجهول هستند که می توان با حل دو معادله مقدار R_1 و A_{Vi} , R_2 را به دست آورد .

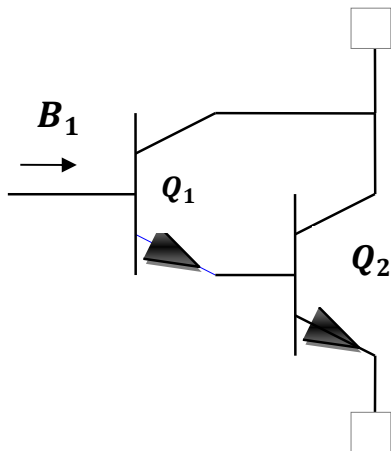
روش دیگری که استفاده از تقریب می باشد و غالباً مورد استفاده قرار می گیرد . به صورت زیر ارائه می شود .

$$\Rightarrow \begin{cases} |A_V| \gg 1 : \text{امیتر مشترک مقدار بزرگی است} \\ |A_V| \cong 1 : \text{کلکتور مشترک} \end{cases} \Rightarrow R_2 = \frac{R_B \times A_{Vi}}{A_{Vi} - 1} \Rightarrow \text{تقریب : } R_B = 200\text{ K}$$

$$A_{Vi} = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} \times [R_C \parallel R_2 \parallel h_{oe}^{-1}] = \frac{-h_{fe}}{h_{ie}} \times [10 \parallel 200 \parallel 40] = -513$$

✓ معرفی زوج دار لینکتون :

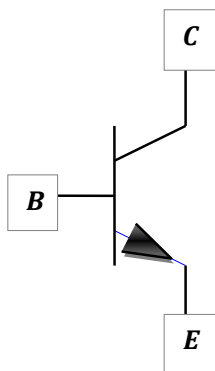
مدار زوج دار لینکتون و روابط آن به صورت زیر می باشد .



$$I_{E1} = \beta_1 I_{B1} = I_{B2}$$

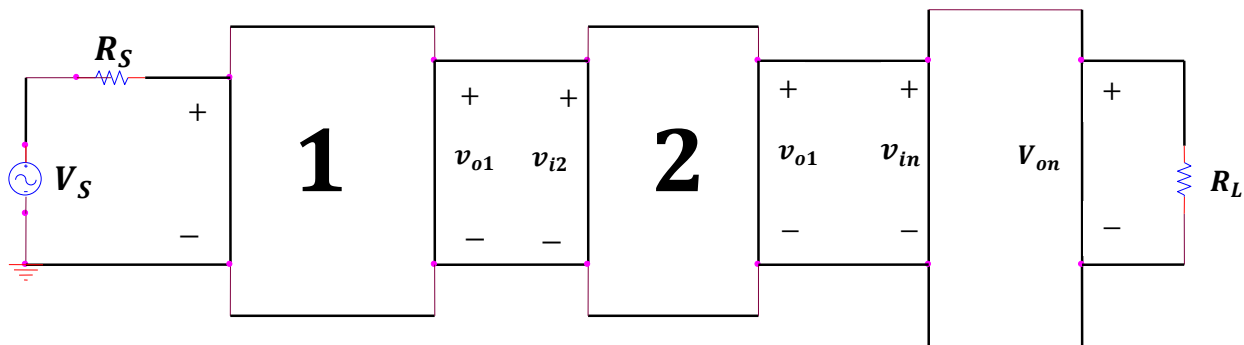
⇒

$$I_{E2} = \beta_2 I_{B2} = \beta_1 \beta_2 I_{B1}$$



$$\beta = \beta_1 \beta_2$$

✓ معرفی تقویت کننده های چند طبقه : Case Cade



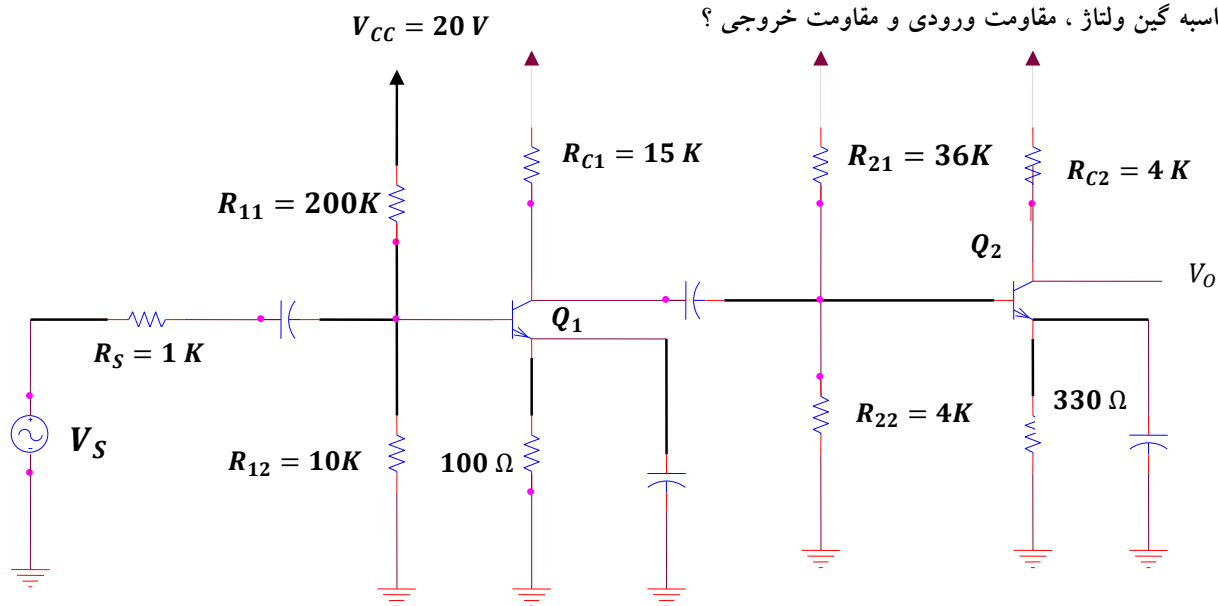
به روابط زیر درباره بهره ولتاژ توجه کنید :

$$A_{V_i} = \frac{v_o}{v_i} \quad , \quad A_{V_S} = \frac{V_O}{V_S} = \frac{V_O}{V_i} \times \frac{V_i}{V_S}$$

$$A_{V_i} = \frac{V_O}{V_i} = \frac{V_{O_n}}{V_{in}} \times \frac{V_{O_{n-1}}}{V_{in_{n-1}}} \times \frac{V_{O_{n-2}}}{V_{in_{n-2}}} \times \dots \dots \dots \frac{V_{O1}}{V_i}$$

مثال (در مدار شکل زیر با فرض اینکه $h_{fe} = 50$, $h_{oe}^{-1} = 40 \text{ k}\Omega$ ، مطلوبست :

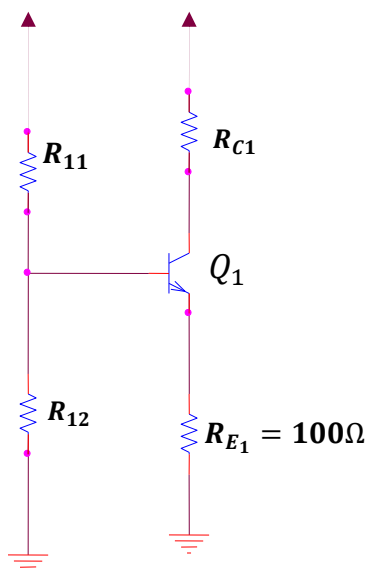
محاسبه گین ولتاژ ، مقاومت ورودی و مقاومت خروجی ؟



حل : ابتدا باید تحلیل DC را برای هر یک از ترانزیستور ها انجام داد :

$$V_{CC} = 20 \text{ V}$$

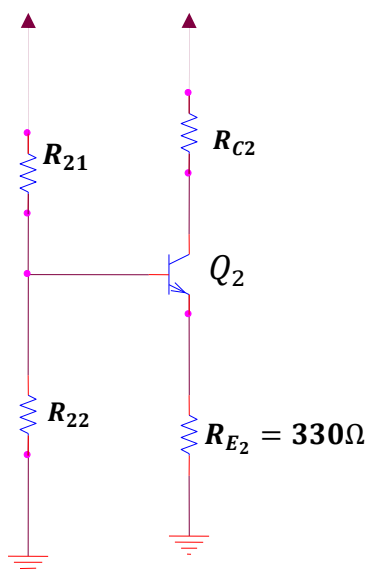
ترانزیستور شماره ۱ :



$$I_{CQ_1} = I_{E_1} = 0.86 \text{ mA}$$

$$h_{ie1} = \frac{\eta V_T h_{fe}}{I_{CQ}} = 2 \text{ K}\Omega$$

ترانزیستور شماره ۲ :



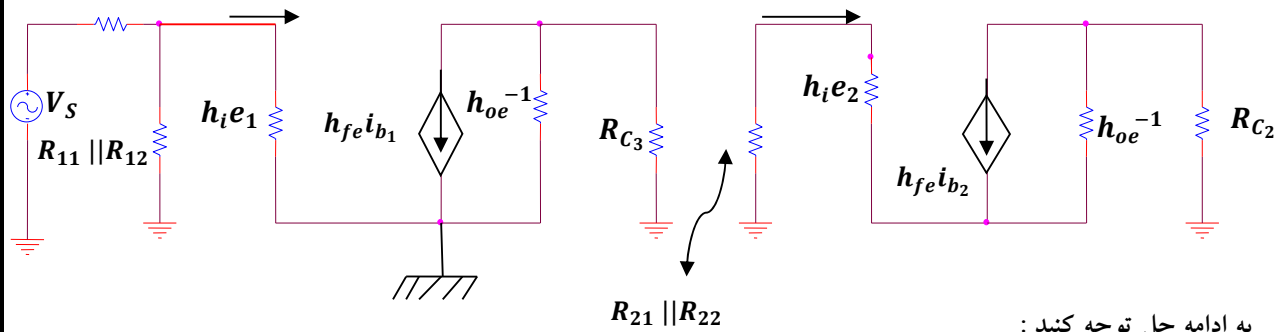
$$I_{CQ_2} = I_{E_2} = 302 \text{ mA}$$

$$h_{ie1} = \frac{\eta V_T h_{fe}}{I_{CQ}} = 550 \Omega$$

هم اکنون مدار زیر را به کمک مدل تقریبی هایبرید H و مدل امیتر مشترک خواهیم داشت :

R_S B_1 i_{b1}

I_{b2}



$$A_{V_i} = \frac{V_O}{V_{O_1}} \times \frac{V_{O_1}}{V_i}$$

$$\frac{V_O}{V_{O_1}} = \frac{-g_m(R_{CC})}{1 + g_m(0)}$$

$$\frac{V_{O_1}}{V_i} = \frac{-g_m(h_{oe}^{-1} || R_{21} || R_{12} || h_{ie} || R_{C_1})}{1 + g_m(0)}$$

$$V_O = -h_{fe} \times i_{b_2} \times [R_{C_2} || h_{oe}^{-1}] \quad \& \quad V_{O_1} = i_{b_2} \times h_{ie_2}$$

$$\frac{V_O}{V_{O_1}} = \frac{-h_{fe}}{h_{ie}} \times [R_{C_2} || h_{oe}^{-1}] = -g_m [R_{C_2} || h_{oe}^{-1}] = -330.6$$

$$V_{O_1} = -h_{fe} \times i_{b_1} (h_{oe}^{-1} || R_{C_3} || R_{21} || h_{22} || h_{ie_2})$$

$$V_i = i_{b_1} \times h_{ie_1}$$

$$\frac{V_{O_1}}{V_i} = \frac{-h_{fe}}{h_{ie_1}} \times (h_{oe}^{-1} || R_{C_1} || R_{21} || h_{ie_2} || R_{22}) = -11.6$$

$$A_{V_i} = \frac{V_O}{V_{O_1}} \times \frac{V_{O_1}}{V_i} = -330.6 \times (-11.6) = 3835$$

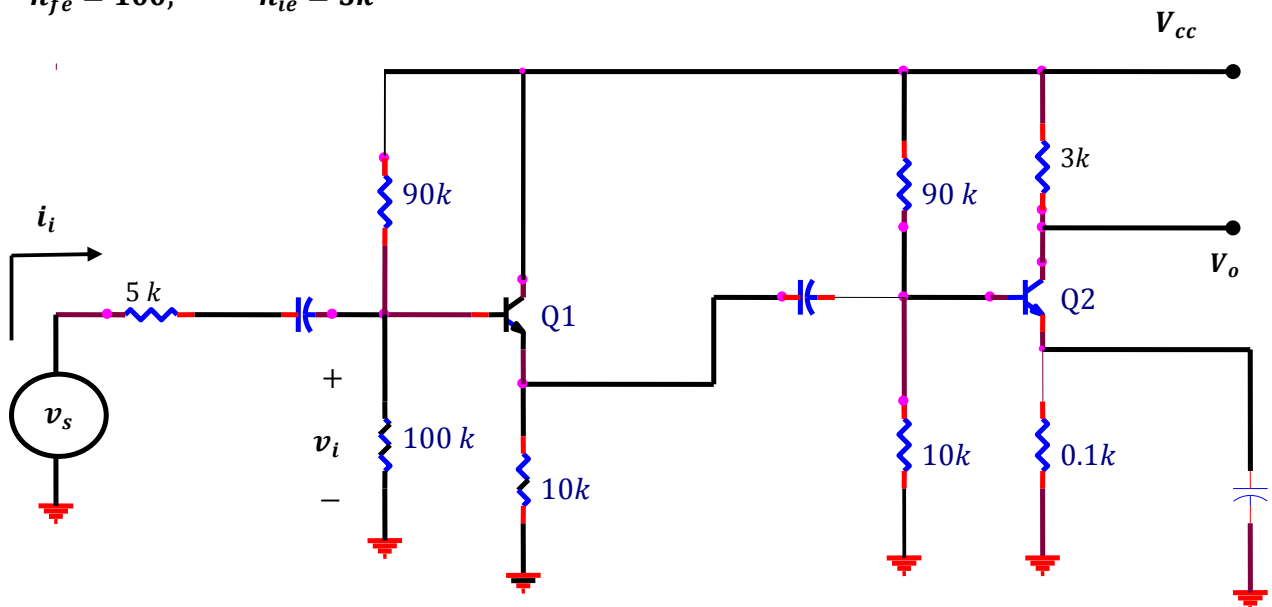
$$R_O = R_{C_2} || h_{oe}^{-1} \quad , R_O' = h_{oe}^{-1}$$

$$R_i = R_1 || R_2 || h_{ie_1}$$

$$A_{V_s} = V_s \times \frac{R_i}{R_i + R_s} \Rightarrow A_{V_s} = A_{V_i} \times \frac{V_i}{V_s}$$

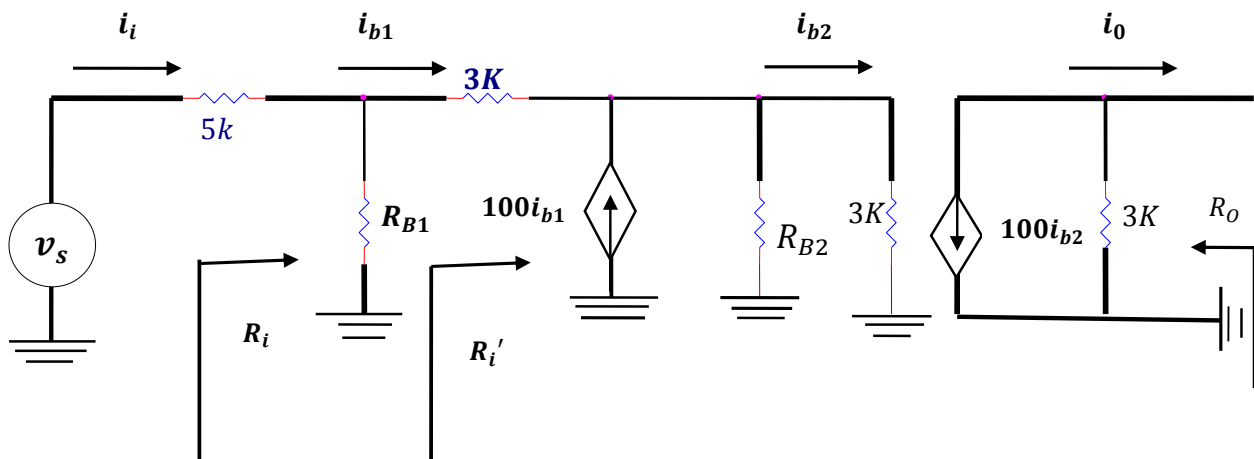
مثال ۱) مطلوبست محاسبه بهره جریان و بهره ولتاژ در مدار شکل زیر ؟

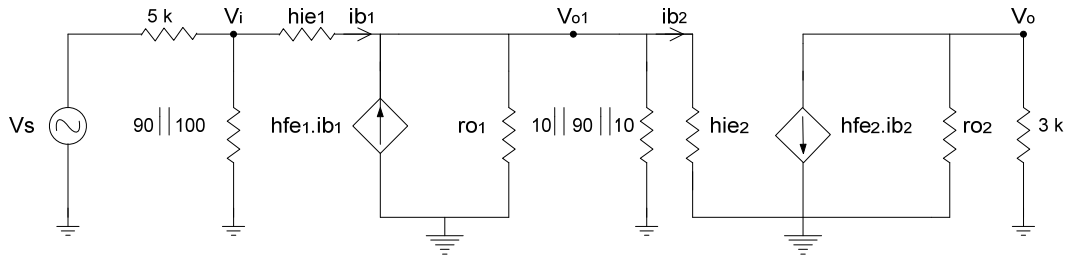
$$h_{fe} = 100, \quad h_{ie} = 3k$$



حل : الف) مدار سیگنال کوچک تقویت کننده با استفاده از مدل

تقریبی هیبرید برای ترانزیستور ها چنین است :





محاسبه R_1 :

$$R_{B1} = 110 \parallel 90 = 49.5 \text{ K}\Omega$$

$$R_{B2} = 90 \parallel 90 \parallel 10 = 4.74 \text{ K}\Omega$$

با انعکاس مقاومت های موجود در امیتر Q_1 مقدار R'_i عبارت است از:

$$R'_i = 3 + (h + h_{fe})(R_{B2} \parallel 3) = 188.6 \text{ K}\Omega$$

$$R_i = R'_i \parallel R_1 = 39.2 \text{ K}\Omega$$

محاسبه A_i :

$$i_o = -100i_{b2} = -100 \left(101 * \frac{R_{B2}}{R_{B2} + 3} \right) = -6185.27i_{b1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left(i_i * \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R'_i} \right) = -1285.89i_i \Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} = -1285.89$$

محاسبه R_o : با صفر کردن منبع سیگنال ورودی، تمام منابع وابسته نیز صفر می شوند بنابراین:

$$R_o = 3 \text{ K}\Omega$$

محاسبه A_{Vi} :

$$A_{Vi} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{3i_o}{R_i i_i} = \frac{3}{39.2} A_i = -98.4$$

حل به کمک روش g_m :

$$h_{fe} = 100, \quad h_{ie} = 3 \text{ k} \Rightarrow g_{m1} = g_{m2} = \frac{100}{3} = 33.3$$

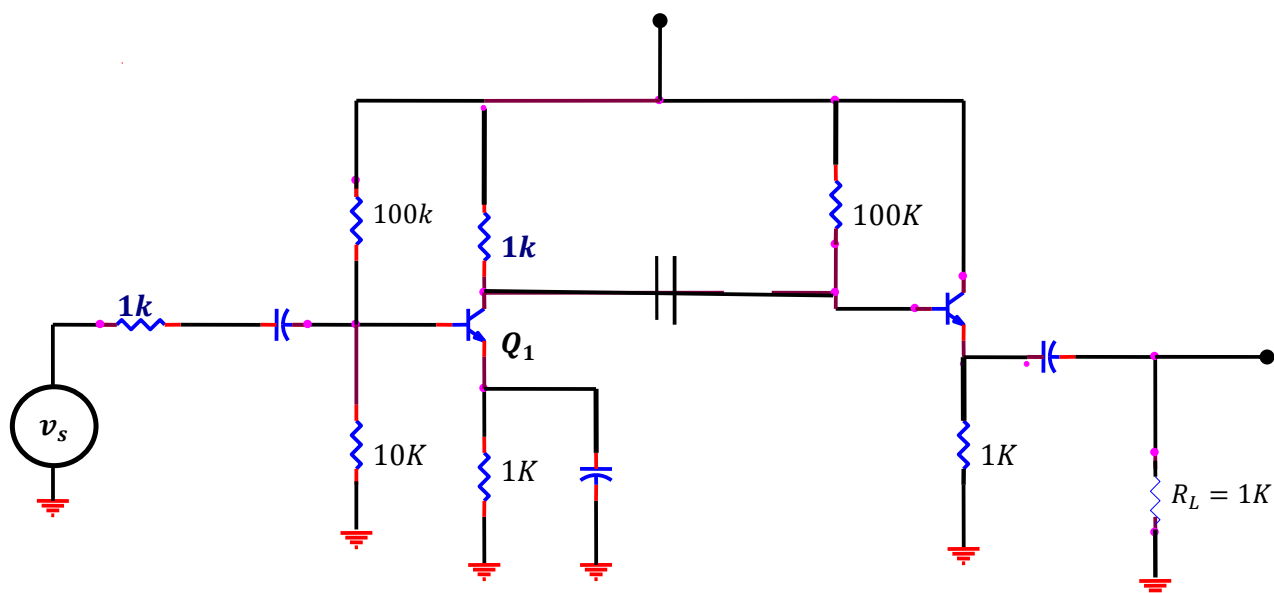
$$A_{v1} = -g_m * 3 = -100$$

$$A_{v2} = \frac{g_m(10 \parallel 10 \parallel 90 \parallel h_{ie})}{1 + g_m(10 \parallel 10 \parallel 90 \parallel h_{ie})} = \frac{33.3 * 1.8}{1 + 33.3 * 1.8} = 0.98$$

$$A_{vi} = \frac{v_o}{v_{o1}} \times \frac{v_{o1}}{v_i} = A_{v1} \times A_{v2} = -98$$

مثال ۲) مطلوبست محاسبه بهره جریان و بهره ولتاژ در مدار شکل زیر ؟ $\beta = 100$

$$V_{cc} = 20 \text{ VOLT}$$



حل : بهره ولتاژ طبقه دوم تقریباً برابر با یک است . بنابراین بهره ولتاژ مدار تقریباً برابر با بهره ولتاژ طبقه اول می باشد .

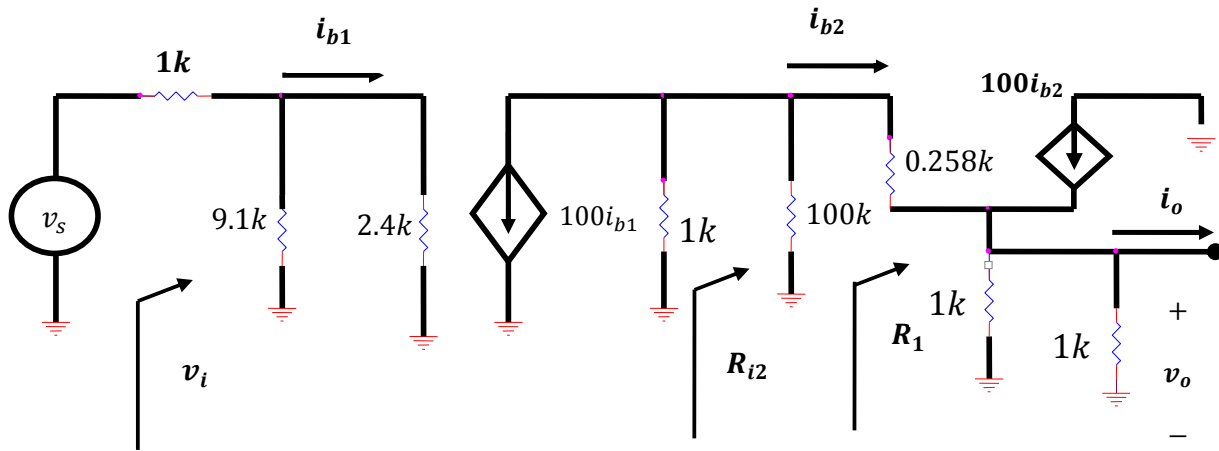
$$I_{EQ1} = \frac{V_{T1} - V_{BE1}}{R_{E1} + \frac{R_{T1}}{1+h_{fe}}} = \frac{1.82 - 0.7}{1 + \frac{9.1}{101}} = 1.03 \text{ mA}$$

$$h_{ie1} = 100 \cdot \frac{25 \cdot 10^{-3}}{1.03} = 2.4 \text{ k}\Omega$$

$$I_{EQ2} = \frac{V_{T2} - V_{BE2}}{R_{E2} + \frac{R_{T2}}{1+h_{fe}}} = \frac{20 - 0.7}{1 + \frac{100}{101}} = 9.7 \text{ mA}$$

$$h_{ie2} = 100 \times \frac{25 \cdot 10^{-3}}{9.7} = 0.258 \text{ k}\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده مطابق شکل زیر خواهد بود :



$$v_o = (1||1)(i_{b2} + 100i_{b2}) = 50.5i_{b2} \quad \& \quad i_{b2} = -100i_{b1} \times \frac{100||1}{100||1 + R_1}$$

$$R_1 = h_{ie2} + (1 + h_{fe})R_{e2} = 0.258 + 101 * 0.5 = 50.76 \text{ k}\Omega$$

$$\Rightarrow i_{b2} = -1.91i_{b1} = -1.91 \times \frac{v_i}{2.4} = -0.8v_i$$

$$\Rightarrow A_{vi} = \frac{v_o}{v_i} = 50.5 * (-0.8) = -40.4 \quad \& \quad R_i = 9.1 || 2.4 = 1.94 \text{ k}\Omega$$

$$\Rightarrow A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{\frac{(1+R_i)v_i}{R_i}} = \frac{R_i}{1 + R_i} A_{vi} = 26.4$$

$$\Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} = \left(\frac{\frac{v_o}{1}}{\frac{v_i}{R_i}} \right) = 1.9A_{vi} = -76.76$$

حل به کمک روش g_m :

$$g_{m1} = \frac{h_{fe}}{h_{ie}} = \frac{100}{2.4} = 41.6 \quad \& \quad g_{m2} = \frac{100}{0.258} = 387$$

$$A_{vi} = \frac{v_o}{v_{o1}} \times \frac{v_{o1}}{v_i} = A_{v1} \times A_{v2}$$

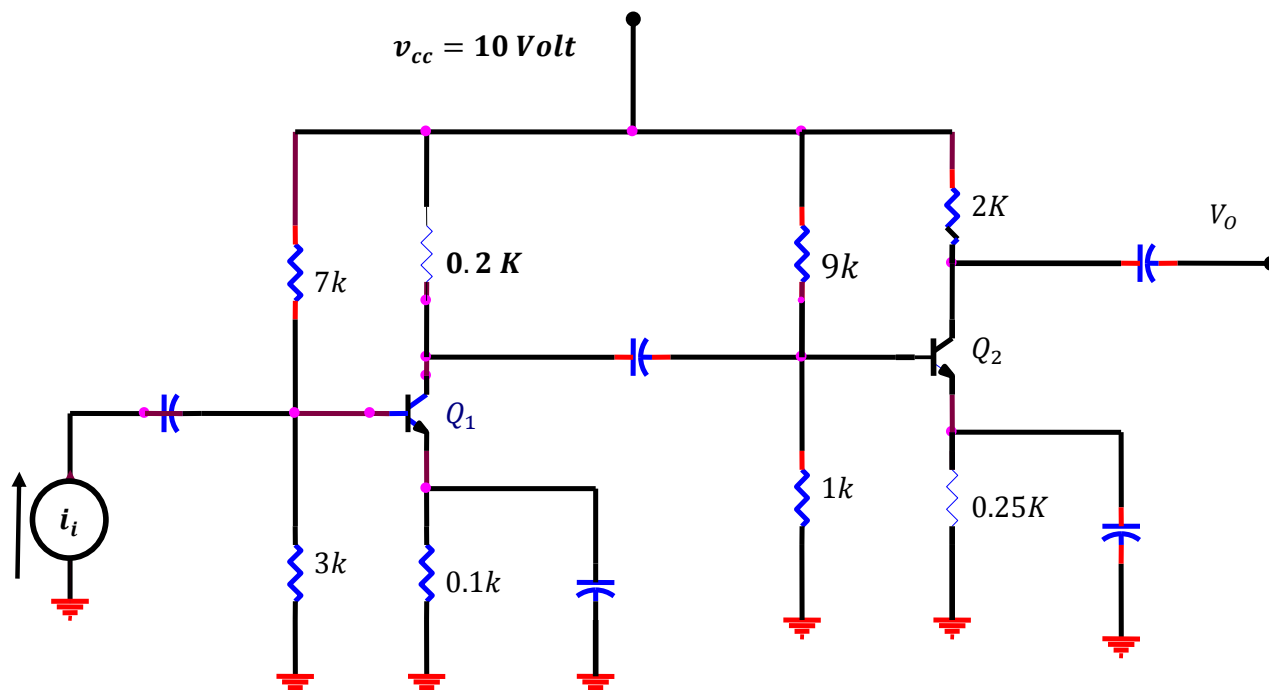
$$A_{v1} = \frac{g_{m2}(1||1)}{1 + g_{m2}(1||1)} = 0.998$$

$$A_{v2} = g_{m1} (1||100||50(0.258 + 100)) = 41$$

$$A_{vi} = \frac{v_o}{v_{o1}} \times \frac{v_{o1}}{v_i} = A_{v1} \times A_{v2} = 0.998 \times 41 = 40.8$$

$$A_{vs} = A_{vi} \times \frac{v_i}{v_s} = 40.8 \times \left(\frac{[100 || 10 || .4]}{1 + (100 || 10 || .4)} \right) = 40.8 * 0.65 = 26.5$$

مثال ۳) مطلوبست محاسبه بهره جریان و بهره ولتاژ در مدار شکل زیر ؟ $\beta = 50$

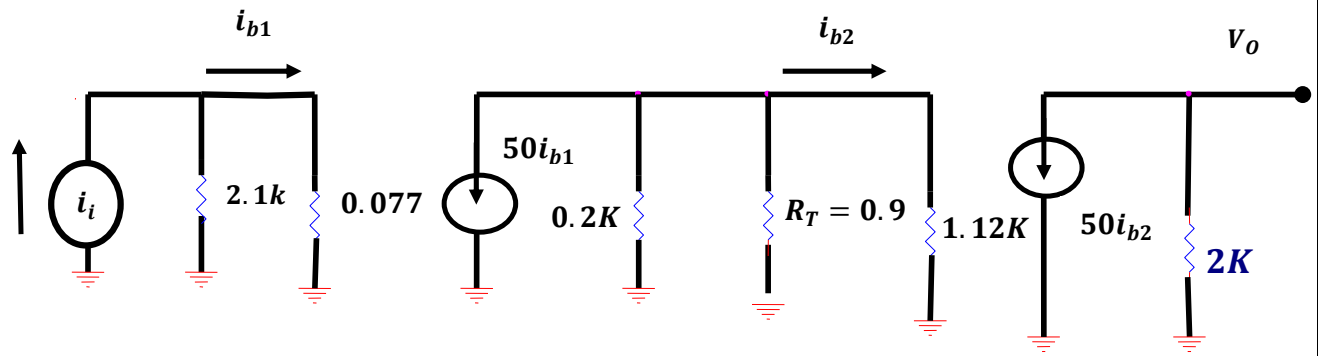


حل :

$$I_{E1} = \frac{V_{T1} - V_{BE1}}{R_{E1} + \frac{R_{T1}}{1+h_{fe}}} = \frac{3 - 0.7}{0.1 + \frac{2.1}{51}} = 16.3 \text{ mA} \Rightarrow h_{ie1} = 77\Omega$$

$$I_{E2} = \frac{V_{T2} - V_{BE2}}{R_{E2} + \frac{R_{T2}}{1+h_{fe}}} = \frac{1 - 0.7}{0.25 + \frac{0.9}{51}} = 1.12 \text{ mA} \Rightarrow h_{ie2} = 1.12k\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده مطابق شکل زیر خواهد بود :



$$V_o = -50i_{b2} * 2 = -10 * \left[-50i_{b1} \times \frac{0.2 || 0.9}{0.2 || 0.9 + 1.12} \right] = 637.4i_{b1} \Rightarrow$$

$$= 677.4 \left[\frac{v_i}{0.077} \right] = 8277.9v_i \Rightarrow A_{vi} = \frac{v_o}{v_i} = 8277.9$$

$$R_i = 2.1 || 0.077 = 74.3 \Omega \quad \& \quad R_o = 2 k$$

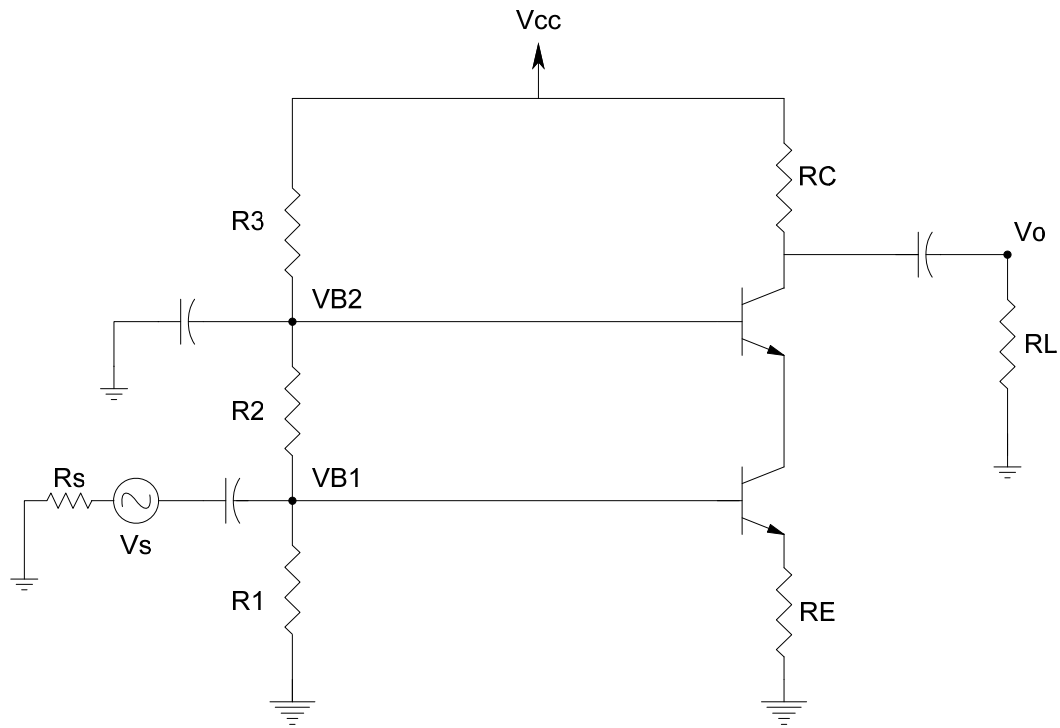
$$g_{m1} = \frac{50}{0.077} = 649 \quad \& \quad g_{m2} = 44.6$$

$$A_{v1} = \frac{50 * 2}{1.12} = -89.2 \quad \& \quad A_{v2} = \frac{-50 * (1.12 || 0.9 || 0.2)}{0.077}$$

$$A_v = A_{v1} * A_{v2} = g_{m2} * g_{m1} (0.2 || 0.9 || 0.077) = g_{m2} * g_{m1} (0.055)$$

$$= 89.2 * 35.69 = 3183.584$$

مثال :



حل :

الف : تحليل DC

$$V_{B1} = \frac{R1}{R1 + R2 + R3} \cdot V_{CC}$$

$$V_{B2} = \frac{R1 + R2}{R1 + R2 + R3} \cdot V_{CC}$$

$$V_{B1} = 0.7 + R_{E1} \cdot I_{E1} \rightarrow I_{E1}$$

$$KVL\ 1 : V_{B2} = 0.7 + V_{CE1} + R_E \cdot I_E \rightarrow V_{CE1}$$

$$KVL\ 2 : V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE2} + V_{CE1} + R_{E1} I_{E1} \rightarrow V_{CE2}$$

الف : تحليل AC

$$V_o = -h_{fe} \cdot i_{b1} \cdot [R_C \cdot R_L / R_C + R_L]$$

$$V_{o1} = -h_{fe} \cdot i_{b2}$$

$$V_i = h_{ie} \cdot i_{b1}$$

