۱۱ . ۱ مسائل فصل اول

۱- مفهوم الکترون آزاد و حفره را در مواد نیمه‌رسانا توضیح دهید.

۲- تفاوت نیمه‌رسانای نوع N و P چیست؟ به طور کامل شرح دهید.

۳- تفاوت باربرهای اکثریت و اقلیت را شرح دهید.

۴- هریک از جریانهای رانشی و پخشی (دفیوژن) را شرح دهید.

۵- آیا تابش نور مرئی می‌تواند در مواد نیمه‌رسانا باربرهای الکترون و حفره تولید کند؟ با محاسبه نشان دهید.

۶- اگر اتم روی به عنوان ناخالصی به نمونه‌ای از سیلیسیم افزوده شود چه اثر الکتریکی در آن ایجاد خواهد کرد؟ به طور کامل شرح دهید.

۷- به نمونه‌ای از نیمه‌رسانای سیلیسیم ناخالصی فسفر با چگالی $N_D = 10^{14}\,cm^{-3}$ افزوده شده است. اگر $n_i = 1.5\times10^{10}\,cm^{-3}$، $\mu_n = 1200\,cm^2/V.\sec$ و $\mu_p = 400\,cm^2/V.\sec$ باشد مطلوب است:

الف- چگالی الکترونها و حفره‌ها در حدود صفر درجه کلوین.

ب- چگالی الکترونها و حفره‌ها در حدود ۳۰۰ درجه کلوین.

ج- رسانایی قطعه در ۳۰۰ درجه کلوین.

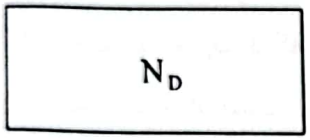
۸- اگر جنس نیمه‌رسانا در مسئله هفتم به جای سیلیسیم، ژرمانیم باشد که در آن $n_i \approx 10^{13}\,cm^{-3}$ و $\mu_n = 3000\,cm^2/V.\sec$ و $\mu_p = 1000\,cm^2/V.\sec$ است. به همان سئوالهای الف و ب و ج پاسخ دهید.

۹- اگر قرار باشد ترمیستوری بسازیم، چه موادی را ترجیح می‌دهید؟ به طور کامل شرح دهید.

۱۰- در یک قطعه سیلیسیم، ناخالصی نوع دهنده با چگالی $N_D = 10^{16}\,cm^{-3}$ تزریق شده است. اگر $n_i = 10^{10}\,cm^{-3}$ باشد، چگالی الکترونها و حفره ها چقدر است؟ اگر به این قطعه علاوه بر ناخالصی دهنده، $5\times10^{15}\,cm^{-3}$ اتم گیرنده اضافه کنیم، چگالی جدید الکترونها و حفره‌ها را حساب کنید.

۱۱- نشان دهید که کمینه رسانایی یک نمونه نیمه‌رسانا هنگامی رخ می‌دهد که $n = n_i\sqrt{\mu_p/\mu_n}$ باشد. مقدار رسانایی در این حالت چقدر است؟

۱۲- اگر دریک نمونه نیمه‌رسانا چگالی ناخالصی طبق شکل $N_D = ax + N_0$ باشد (a>0) و هیچ‌گونه میدان الکتریکی خارجی وجود نداشته باشد:



الف- آیا اساساً جریانی در این نمونه وجود دارد؟ چرا؟ شرح دهید.

ب- اگر جریانی وجود دارد آیا این جریان دائمی است؟

ج) وضعیت نیمه‌رسانا در نهایت چه خواهد بود؟

۱۳- آیا سیلیسیم ماده‌ای کدر است؟ ژرمانیم چطور؟ چرا؟

۱۴- آیا یک نیمه‌رسانای نوع N در تمام دماها همچنان N باقی می‌ماند؟

۱۵- هرگاه الکترونی بین دو صفحه که اختلاف پتانسیل آن ۱۰۰ ولت است جابجا شود، انرژی آن چند الکترون ولت تغییر می‌کند؟ مقدار این انرژی بر حسب ژول چقدر است؟

۱۶- مطلوب است تعیین چگالی الکترونها و حفره‌ها در یک نیمه‌رسانای نوع N اگر مقاومت ویژه آن ۵ اهم سانتیمتر و یا 0.1 اهم سانتیمتر باشد. $\mu_n = 1000\,cm^2/V\cdot\sec$ در نظر گرفته شود.

۱۷- مسئله ۱۶ را برای یک نیمه‌رسانای نوع P تکرار کنید. فرض کنید $\mu_p = 300\ cm^2/V\cdot\sec$ است.

۱۸- مقاومت ویژه نمونه‌ای از سیلسیم ذاتی در ۳۰۰ درجه کلوین چقدر است؟

۱۹- برای جابجایی یک کولمب بار بین دو صفحه که ۱۰ ولت اختلاف پتانسیل دارد، چقدر انرژی لازم است؟

۲۰- تفاوت‌های عبور یک الکترون در خلاء و در درون یک ماده را شرح دهید؟

۲۱- برداشت خود از پیوند فلزی و پیوند کووالانس را بیان کنید.

۱.۱۲ حل بعضی از مسائل فصل اول

۵- نور مرئی از قرمز تا بنفش را شامل می‌شودکه طول موج 0.7 میکرومتر تا حدود 0.3 میکرومتر را در بر می‌گیرد. انرژی فوتونهای نور مرئی با توجه به این طول موجها برابر است با :

$$f_{min} = \frac{c}{\lambda} = \frac{3\times10^8\,m/\sec}{0.7\times10^{-6}\,m} = \frac{3}{7}\times10^{15}\,Hz$$

$$f_{max} = \frac{3\times10^8}{0.3\times10^{-6}} = 10^{15}\,Hz$$

انرژی فوتونهای هر موجی با فرکانس f برابر است با:

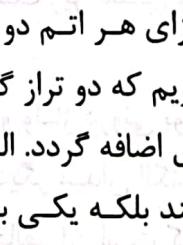
$$E = hf$$

$$E_{min} = 6.63 \times 10^{-34} J.sec \times \frac{3}{7} \times 10^{15} = 2.84 \times 10^{-19} J = 1.75eV$$

$$E_{max} = 6.63 \times 10^{-34} \times 10^{15} = 6.6 \times 10^{-19} J = 4.125eV$$

حال اگر موادی که شکاف انرژی آنها زیر ۲ الکترون ولت است، به عنوان نیمه‌رسانا در نظر بگیریم، نور قرمز تنها می‌تواند در نیمه‌رساناهایی که شکاف انرژی آنها کمتر از $1.75eV$ است الکترون و حفره تولید کند. در حالی‌که نور بنفش می‌تواند در نیمه‌رساناهایی که شکاف انرژی آنها زیر حدوداً چهارالکترون ولت است الکترون و حفره تولید کند. بنابراین نور مرئی قادر خواهد بود تا در پاره‌ای از مواد نیمه رسانا حامل‌های الکترون و حفره تولید نماید.

۶- اتم روی در مدار خارج خود تنها دو الکترون دارد. بنابراین اگر اتم روی به عنوان ناخالصی به سیلیسیم اضافه شود، به ازای هر اتم دو الکترون کمبود خواهد داشت. لذا انتظار داریم که دو تراز گیرنده به باند ممنوع سیلیسیم طبق شکل اضافه گردد. البته این دو تراز در یک انرژی واقع نیستند بلکه یکی به باند والانس نزدیک‌تر و دومی دورتر از آن قرار می‌گیرد. زیرا اگر یک اتم روی، یک الکترون از باند والانس بگیرد و یونیزه شود، گرفتن الکترون دیگرمشکل‌تر می باشد که این دشواری با فاصله تراز انرژی از باند والانس نشان داده می‌شود.



۷- الف- چگالی الکترونها و حفره‌ها در صفر درجه کلوین صفر است.

$$n \approx N_D^+ = N_D = 10^{14} cm^{-3}$$

ب-

$$np = n_i^2 \quad , \quad p = 2.25 \times 10^6 cm^{-3}$$

$$\sigma \cong qn\mu_n = 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{14} \times 1200$$

ج-

$$\sigma = 19.2 \; mmho \; /cm$$

۸- در این مسئله مشابه مسئله ۷ عمل می‌کنیم منتهی باید دقت کنیم که چگالی n و p در دمای ۳۰۰ درجه کلوین به دلیل بزرگ بودن n_i ، بهم نزدیک هستند، در نتیجه باید از معادله کامل برای محاسبه n و p استفاده کنیم.

۹- ترمیستور در واقع مقاومت متغیر با دما است. اگر مقدار مقاومت با افزایش دما زیاد شود به آن PTC[1] و اگر با افزایش دما کاهش یابد به NTC[2] موسوم است. از آنجایی‌که رسانایی مواد

1- Positive Thermal Coefficient
2- Negative Thermal Coefficient

نیمه‌رسانای ذاتی با افزایش دما زیاد می‌شود، بنابراین ترمیستورهای NTC را می‌توان با مواد نیمه‌رسانای ذاتی ساخت.

-۱۰

$$n \approx N_D = 10^{16}\, cm^{-3}$$
$$np = n_i^2 \Rightarrow p = 10^4\, cm^{-3}$$

از آنجایی که $N_D \rangle N_A$ است بنابراین نیمه‌رسانا همچنان N ، باقی می‌ماند و چگالی الکترونها برابر است با:

$$n = N_D^+ - N_A^- = N_D - N_A = 5 \times 10^{15}\, cm^{-3}$$
$$P = 2 \times 10^4\, cm^{-3}$$

۱۲- الف- در ابتدا جریانی در نمونه وجود خواهد داشت زیرا شیب چگالی ناخالصی وجود دارد، یعنی چگالی الکترونها تابع x است. ب- جریان دائمی نیست زیرا هیچ میدان خارجی وارد نشده است و نهایتاً قطعه به تعادل می‌رسد.

ج- پس از برقراری جریان، میدان داخلی شکل می‌گیرد و ولتاژ درونی بوجود می‌آید. ولتاژ بوجود آمده خود سدی در مقابل جریان ایجاد می‌کند. به زبان دیگر میدان الکتریکی داخلی جریان رانشی ایجاد می‌کند که با جریان دفیوژن برابر ولی در جهت مخالف آن است که جریان کل صفر می‌شود.

۱۴- خیر، زیرا با افزایش دما چگالی باربرهای ذاتی n_i افزایش یافته و در نتیجه موجب افزایش حاملهای اقلیت می‌گردد تا جایی‌که n و p بهم بسیار نزدیک می‌شوند که گوییم نیمه‌رسانای N به ذاتی تبدیل شده است. حد حرارتی مواد نیمه‌رسانا نیز با این دما تعیین می‌شود.

۲.۱۱ مسائل فصل دوم

۱- چرا یک پیوند PN را نمی‌توان از به هم چسباندن دو نیمه‌رسانای N و P بدست آورد؟

۲- آیا ولتاژ سد یک پیوند PN از بیرون قابل اندازه‌گیری است؟

۳- آیا ولتاژ اعمال شدهٔ به پیوندگاه در گرایش موافق می‌تواند بیشتر از ولتاژ سد گردد؟

۴- منحنی مشخصهٔ $i(v)$ دو دیود با ناخالصی‌های $N_A = 10^{15} cm^{-3}$ ، $N_D = 10^{15} cm^{-3}$ ، $N_A = 10^{16} cm^{-3}$ و $N_D = 10^{19} cm^{-3}$ را به طور نسبتاً دقیق ترسیم کنید. جنس ماده اصلی را سیلیسیم در نظر بگیرید.

۵- در یک پیوند PN که ناخالصی طرفین پیوند $10^{16} cm^{-3}$ است، پتانسیل سد و پهنای ناحیه تخلیه طرفین پیوند را حساب کنید. اگر ناخالصی طرف N را ۱۰۰۰ برابر افزایش دهیم، پتانسیل سد و پهنای ناحیه تخلیه طرفین چه مقدار تغییر خواهند کرد؟ از این محاسبه چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟ $n_i = 1.5 \times 10^{10} cm^{-3}$ و $\varepsilon_{rsi} = 12$

۶- هرگاه چگالی ناخالصی‌های طرفین یک پیوند PN را دو برابر کنیم، جریان اشباع مخالف آن چند برابر می‌گردد؟

۷- در یک پیوند P^+N ، پهنای ناحیهٔ تخلیه در کدام طرف بیشتر است؟ با رابطه نشان دهید.

۸- منحنی مشخصه یک پیوند PN را که در آن $I_S = 10^{-14}$ آمپر و n=1 است، در دمای اتاق ترسیم کنید (با نقطه‌یابی).

۹- اگر جریان اشباع معکوس دیودی $I_s = 10^{-14}$ آمپر باشد، مقدار جریان این پیوند در ولتاژهای موافق ۰/۵، ۰/۵۵، ۰/۶، ۰/۶۵و ۰/۷ ولت را حساب کنید. ولتاژ دو سر پیوند را چه مقدار افزایش دهیم تا جریان آن ۱۰۰ برابر گردد؟

۱۰- در معادله دیود چه چیزی جنس ماده دیود را مشخص می‌کند؟ یعنی اگر به جای سیلیسیم از ژرمانیم استفاده کنیم چه چیزی در معادله دیود تغییر خواهد کرد؟

۱۱- اگر مقاومت ویژه مناطق N و P در یک پیوند پله‌ای به ترتیب $1\Omega cm$ و $0.01\Omega cm$ باشد، مطلوب است تعیین پتانسیل سد و عرض نواحی تخلیه. جنس نیمه‌رسانا را سیلیسیم فرض کنید. قابلیت حرکت در نیمه‌رسانای نوع N ، $\mu_n = 1000\ cm^2/V.sec$ و در نیمه‌رسانای نوع P ، $\mu_p = 400\ cm^2/V.sec$ در نظر گرفته شود.

۱۲- به ازای چه مقدار از ولتاژ گرایش معکوس، جریان معکوس به ۹۹ درصد جریان اشباع معکوس در دمای ۳۰۰ درجه کلوین می‌رسد؟

۱۳- چه مقدار افزایش در دما موجب ۱۰۰۰ برابرشدن جریان اشباع معکوس در ۳۰۰ درجه کلوین می‌گردد؟

۱۴- جریان ۱۰ میلی آمپر از دیودی می‌گذرد، اگر دمای قطعه از $40^{\circ}C$ به $-10^{\circ}C$ کاهش یابد، ولتاژ دو سر دیود برای عبور همان جریان چقدر تغییر خواهد کرد؟

۱۵- جریان دیودی در ۰/۶ ولت موافق ۲۰ میلی آمپر است، جریان آن در ۱۰ ولت معکوس چقدر خواهد بود؟

۱۶- دیودی که پتانسیل سد آن ۰/۸ ولت است، بدون اعمال ولتاژ خارجی دارای ظرفیت 1PF است. اگر ۴ ولت معکوس به آن اعمال کنیم ظرفیت پیوند آن چقدر خواهد بود؟

۱۷- اگر با تابش نور در یک پیوند PN الکترون و حفره جدید تولید کنیم، وضع پیوند از نظر جریان دهی چگونه خواهد بود؟ در هر دو گرایش بررسی کنید.

۱۸- در مداری متشکل از یک دیود که به طور سری با یک مقاومت ۱ کیلو اهم و منبع ولتاژ DC ده ولتی قرار دارد (دیود در گرایش موافق است).

الف- اگر جریان دیود در $V_D = 0.6$ ولت ۲ میلی آمپر باشد، جریان مدار و ولتاژ دو سر دیود چقدر است؟

ب- اگر دیود دیگری که ولتاژ شکست آن ۶ ولت است به طور سری به مدار اضافه شود به طوری که از نظر باتری در گرایش مخالف قرار گیرد، جریان مدار چقدر خواهد شد؟

۱۹- ظرفیت یک پیوند PN در کدام گرایش بیشتر است، موافق یا معکوس؟ توضیح دهید.

۲۰- چگالی ناخالصی‌ها در یک پیوند تیز برابر است با::

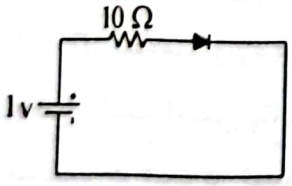
$N_A = 5 \times 10^{15}\ cm^{-3}$, $N_D = 10^{17}\ cm^{-3}$

الف) پتانسیل اتصال را در دمای اتاق با $n_i = 10^{10}\ cm^{-3}$ بدست آورید.

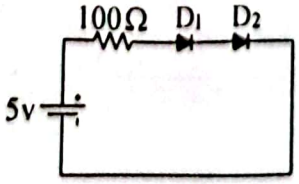
ب) پهنای ناحیه تخلیه در هر طرف اتصال، $\varepsilon_{si} \approx 10^{-12}\ F/cm$ را محاسبه کنید.

ج) بیشینه شدت میدان الکتریکی در ناحیه تخلیه و محل وقوع آن.

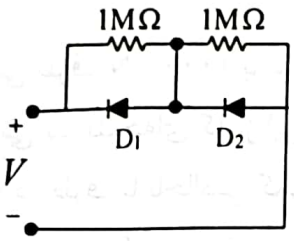
۲۱- جریان مدار زیر در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد را با توجه به اینکه $V_D = 0.7$ ولت است بدست آورید. اگر بخواهیم در ۱۱۰ درجه سانتیگراد، جریان همچنان روی مقدار قبلی ثابت بماند، چه مقاومتی باید با دیود سری شود؟ $\partial V_D / \partial T = -2\ mV/C^{\circ}$ و ثابت فرض شود.



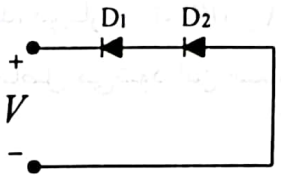
۲۲- جریان مدار شکل زیر را با توجه به اینکه ولتاژ هر دیود به ازای جریان یک میلی‌آمپر ۰/۶ ولت و n در رابطه دیود یک باشد، بدست آورید.



۲۳- مدار شکل الف شامل دو دیود سری است. هرگاه جریان اشباع معکوس D_1 ، یک میکرو آمپر و D_2 ، دو میکرو آمپر و ولتاژ شکست هر دیود ۶۰ ولت باشد، مطلوب است:
الف) اگر ولتاژ وارده به مدار ۵۰ یا ۸۰ ولت باشد، ولتاژ دو سر هر دیود چقدر است؟
ب) هرگاه مانند شکل ب یک مقاومت یک مگا اهم با هر دیود موازی کنیم و مجدداً همان ولتاژها را به مدار اعمال نماییم، ولتاژ و جریان هر دیود در این حالت چقدر خواهد بود؟ وظیفه مقاومتها در مدار چه می‌تواند باشد؟



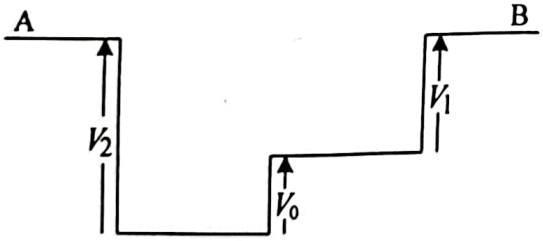
(ب)



(الف)

۲۴- مداری ترسیم کنید که با استفاده از آن و نرم‌افزار PSPICE به توان منحنی مشخصه دیود 1N4001 را ترسیم کرد.سپس آن را با منحنی مشخصه دیود مسئله ۸ را مقایسه کنید.

۲.۱۲ حل بعضی از مسائل فصل دوم



۲- خیر، زیرا در هر کنتاکت فلزی با نیمه‌رسانای N و P نیز ولتاژ اتصالی وجود دارد که اختلاف پتانسیل کل طبق شکل، از نظر دو پایانهٔ بیرونی صفر ولت است. (شکلها تنها به منظور نشان دادن اختلاف پتانسیل اتصالها ترسیم شده است و از دقت کافی برخوردار نیست که البته برای این مسئله مناسب می باشد.)

$$V_{AB} = V_2 - (V_0 + V_1) = 0$$

۵-

$$N_A = N_D = 10^{16}\,cm^{-3}$$
$$n_i = 1.5 \times 10^{10}\,cm^{-3}$$

پتانسیل سد برابر است با:

$$V_o = \frac{KT}{q} Ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.026\, Ln \frac{10^{32}}{2.25 \times 10^{20}}$$

$$V_o = 0.697V$$

پهنای کل ناحیه تخلیه نیز با استفاده از معادله ۲-۲ بدست می‌آید.

$$W = (\frac{2\varepsilon_{si}V_n}{qN})^{1/2} \quad , \quad N = \frac{1}{2} \times 10^{16}\, cm^{-3}$$

$$W = (\frac{2 \times 12 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 0.697}{1.6 \times 10^{-19} \times 1\ 2 \times 10^{16}})^{1/2} = 0.43\,\mu m$$

سپس عرض ناحیه تخلیه در هر منطقه به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$W = X_n + X_p \quad , \quad X_n N_D = X_p N_A \Rightarrow X_n = X_p$$

$$X_n = X_p = 0.215\ \mu m$$

اگر چگالی ناخالصی طرف N ، ۱۰۰۰ برابر افزایش یابد، دوباره V_n، W، X_n و X_p با استفاده از روابط بالا بدست می‌آید. نتیجه‌ای که از این محاسبات حاصل می‌شود این است که همیشه قسمت اعظم ناحیه تخلیه در طرف با ناخالصی کمتر است.

۱۰- اثرات جنس ماده در I_s نهفته است. I_s در واقع ناشی از حاملهای اقلیت طرفین پیوند می‌باشد که مقدار آنها تابع چگالی الکترونهای ذاتی است. چگالی الکترونهای ذاتی در هر دمایی تابع جنس نیمه رسانا می‌باشد. بنابراین با تغییر جنس نیمه‌رسانا، I_s تغییر خواهد کرد.

۱۶- اساساً ظرفیت هر پیوند PN با رابطه $C = A\,\varepsilon/W$ که عرض ناحیه تخلیه پیوند است قابل محاسبه می‌باشد. بنابراین با جایگزین کردن W، ظرفیت بر حسب ولتاژ اتصال نتیجه می‌شود:

$$C = A\varepsilon(\frac{qN}{2\varepsilon V_t})^{1/2} = A(\frac{qN\varepsilon}{2V_t})^{1/2}$$

که در آن V_t مجموع ولتاژهای سد و ولتاژ اعمال شدهٔ خارجی در پیوند است. اگر ولتاژ وارده موافق باشد، $V_t = V_0 - V_R$ و اگر مخالف باشد، $V_t = V_0 + V_R$ خواهد بود. در نتیجه:

$$\frac{C_2}{C_1} = (\frac{V_{t1}}{V_{t2}})^{1/2} = (\frac{0.8}{4.8})^{1/2}$$

$$C_2 = 1\,pf \times (\frac{1}{6})^{1/2} = 0.408\ pf$$

۱۷- با تابش نور بر روی یک پیوند PN ، چگالی حاملهای اقلیت در طرفین پیوند افزایش می‌یابد که موجب افزایش جریان معکوس و کاهش جریان موافق پیوند می‌گردد. البته از اثر تولید نوری در ناحیه تخلیه به دلیل حجم کم آن صرفنظر شده است.

۲۰-

$$V_0 = 0.76V$$

$$W = 0.447\mu m$$

بیشینه شدت میدان در پیوندگاه رخ می‌دهد که مقدار آن برای یک پیوند پله‌ای برابر است با:

$$E_0 = \frac{2V_0}{W} = \frac{1.52}{0.447 \times 10^{-4}} = 3.4 \times 10^4 \quad V/cm$$

۲۱- R=5.7 اهم

۲۲- I=36.1 میلی‌آمپر

۲۳- الف) به ازای ۵۰ ولت $V_{D1} = -49.983\,V$ و $V_{D2} = -0.017$ ولت.

به ازای ۸۰ ولت $V_{D1} = -60V$ و $V_{D2} = -20$ ولت.

ب) هنگامی که مقاومت با دیودها موازی می‌شود، ولتاژ به طور تقریباً مساوی بین دیودها افت خواهد کرد و در دو حالت ۵۰ و ۸۰ ولت خواهیم داشت.

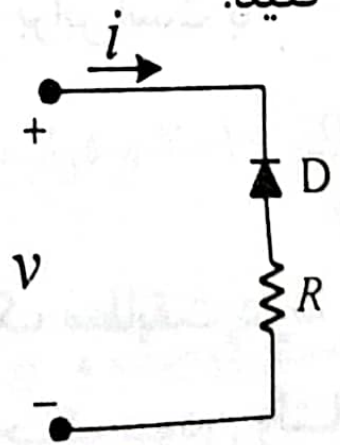
$$V_{D1} = -25.5V \quad , \quad V_{D2} = -24.5V$$

و

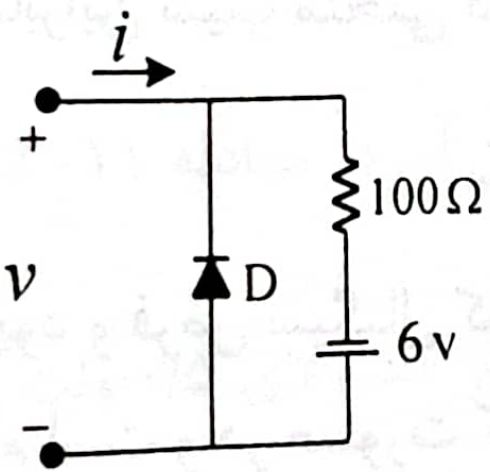
$$V_{D1} = -40.5V \quad , \quad V_{D2} = -39.5V$$

۳.۶ مسائل فصل سوم

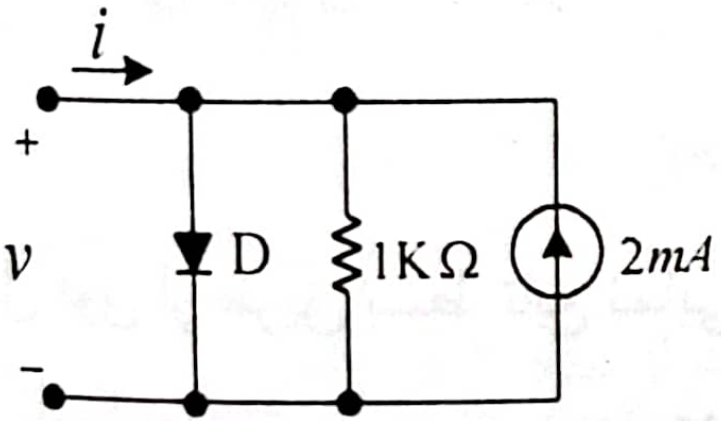
۱- رابطه $i(v)$ را برای هریک از مدارهای شکل زیر تعیین و منحنی آن را ترسیم کنید. دیودها را ایده‌ال فرض کنید.



(الف)

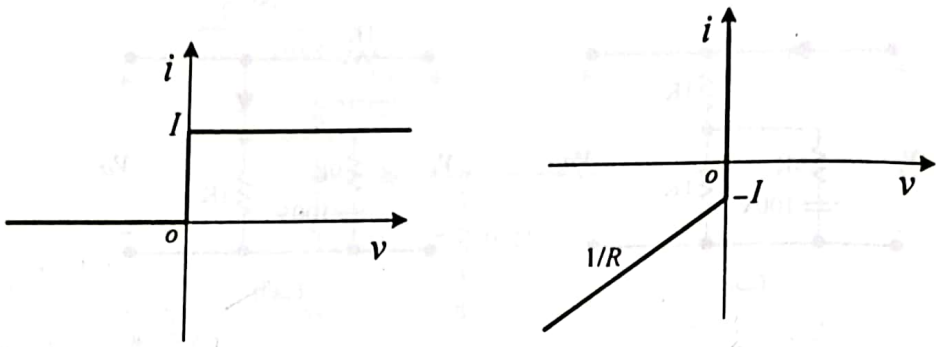


(ب)



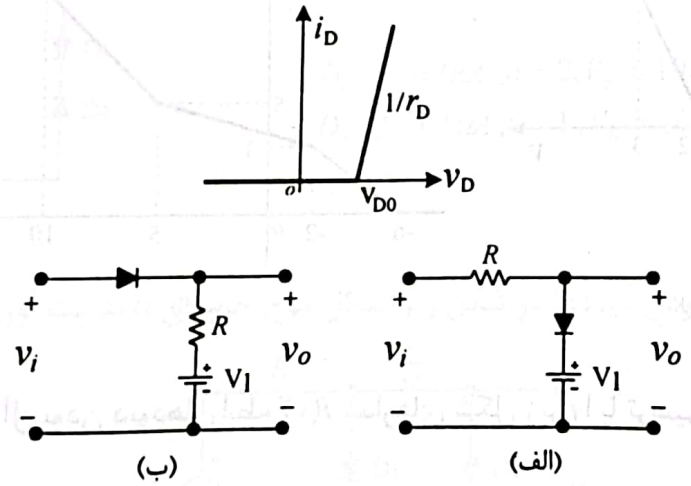
(ج)

۲- برای هر یک از منحنی‌های شکل زیر با استفاده از افزاره‌های ایده‌آل، مدار مناسب بیابید.



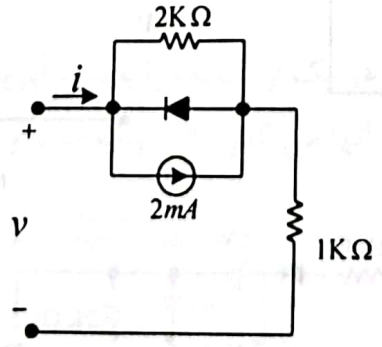
(ب) (الف)

۳-در مدارهای شکل زیر اگر منحنی مشخصه دیـود مطـابق شـکل باشـد، مشـخصه انتقـالی مـدار $v_o(v_i)$ را بدست آورده و ترسیم کنید.

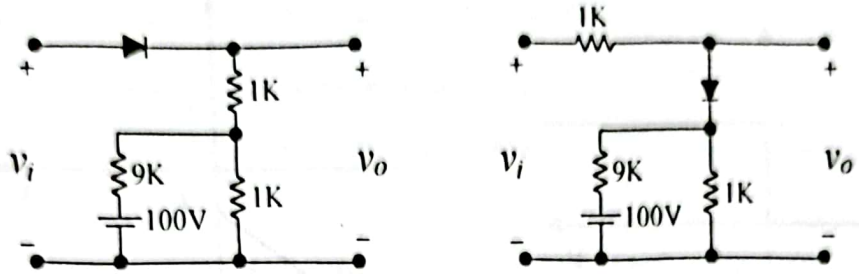


(ب) (الف)

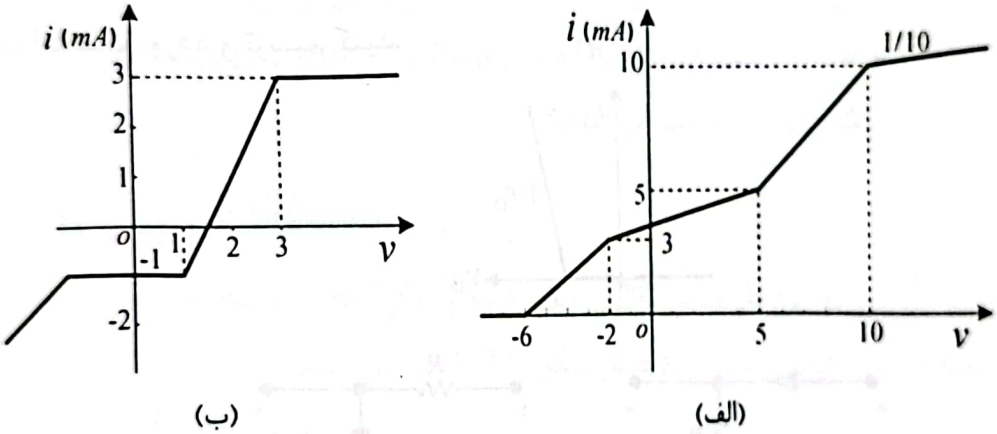
۴- منحنی $i(v)$ مدار شکل زیر را ترسیم کنید. دیود را ایده‌آل فرض کنید.



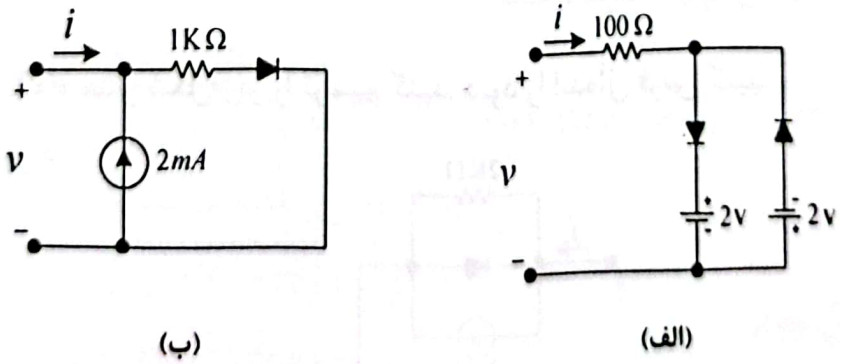
۵- در مدارهای شکل زیر در صورتی‌که $r_D = 50\Omega$ ، $V_{D0} = 0.6V$ و $R_r = \infty$ باشـد، شـکل مـوج خروجی را برای سیگنال ورودی $v_i = 20V \sin \omega t$ ترسیم نمایید.

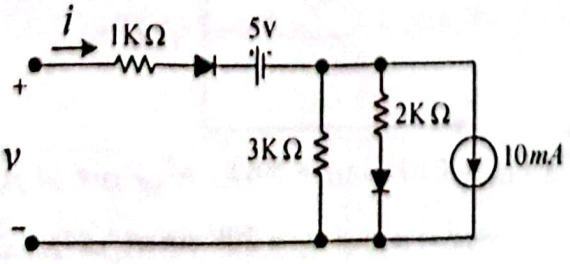


۶- مدارهای مربوط به مشخصه‌های $i(v)$ شکل زیر را با استفاده از عناصر ایده‌آل بیایید.

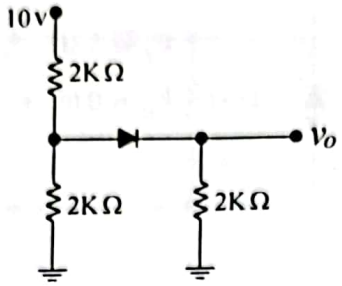


۷- با فرض ایده آل بودن دیودها، رابطه $i(v)$ مدارهای شکل زیر را با ترسیم نشان دهید.

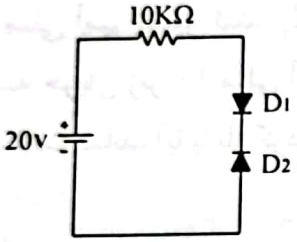




۸- در صورتیکه ولتاژ آستانه دیود در شکل مقابل ۰/۷ ولت باشد، ولتاژ خروجی V_o چقدر است؟

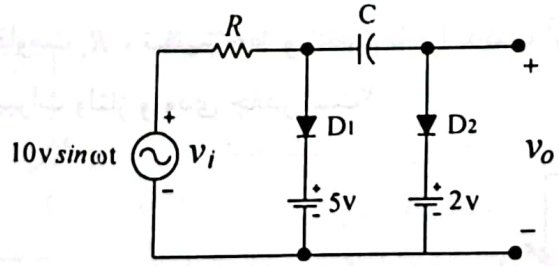


۹- مطلوبست تعیین جریان و ولتاژ دو سر هر دیود در مدار شکل زیر:

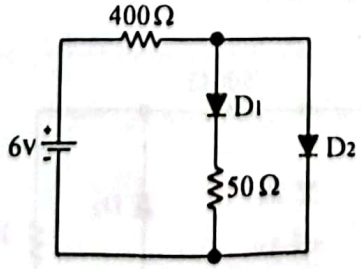


$$D_1 : I_S = 1nA \ , n = 2, V_B = 10V$$
$$D_2 : I_S = 1\mu A \ , n = 1 \ , V_B = 100V$$

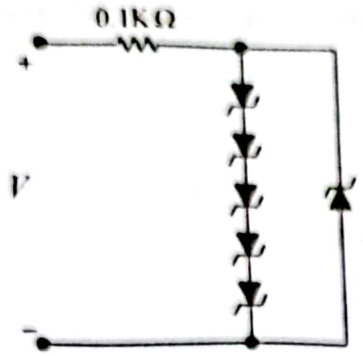
۱۰-با فرض ایده آل بودن دیودها در شکل زیر، شکل موج خروجی را بدست آورید.



۱۱-در مدار شکل زیر، جریان هر یک از دیودها را بدست آورید. ولتاژ دو سر هر یک از دیودها وقتی جریان یک میلی آمپر از آنها می گذرد ۰/۶ ولت است و $n = 1$ می باشد.



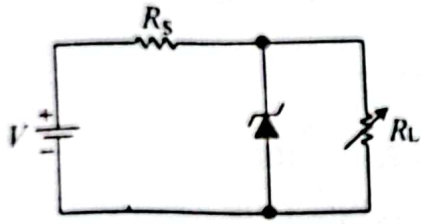
۱۲- در مدار شکل زیر از دیود زنر با مشخصات داده شده استفاده شده است، جریان هر یک از شاخه ها را بدست آورید. مسئله را یک بار با $V = 5$ ولت و بار دیگر با $V = 10$ ولت حل کنید.



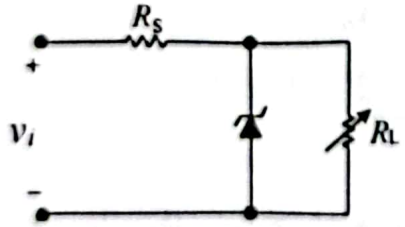
$V_\gamma = 3.3V$

$V_D = 0.6V \leftarrow I_D = 1mA$ به ازای

۱۳- در مدار شکل مقابل دیود زنر با توان مصرفی ۱ وات و ولتاژ ۷/۵ ولت بکار رفته است. اگر $V = 10$ ولت و جریان مقاومت بار از ۲۰ میلی آمپر تا ۹۰ میلی آمپر تغییر کند، R_s را طوری تعیین کنید تا با کمینه جریان زنر ۱۰ میلی آمپر، ولتاژ خروجی روی ۷/۵ ولت ثابت بماند. آیا با باز کردن بار، دیود صدمه می بیند؟



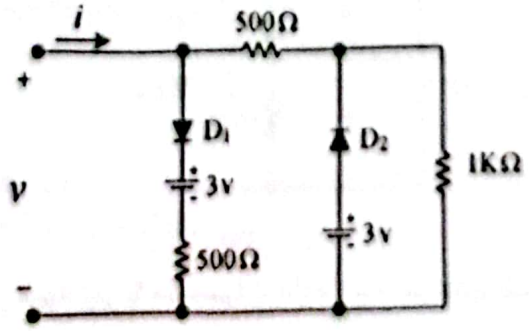
۱۴- در مدار شکل زیر می خواهیم با دیود زنر با مشخصات داده شده ولتاژ خروجی را در حدود ۱۰ ولت حفظ کنیم، ضمن اینکه ولتاژ ورودی بین ۱۴ تا ۱۸ ولت و جریان بار بین ۵ تا ۲۵ میلی آمپر تغییر می کند. مقدار مقاومت R_s ، تنظیم خط و تنظیم بار را بدست آورید. درصد تغییرات ولتاژ خروجی به ازای کل تغییرات ولتاژ ورودی چقدر است؟



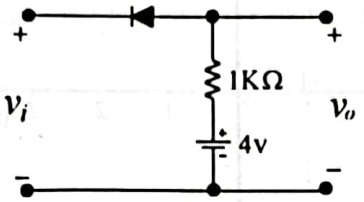
$V_z = 10V, I_{ZT} = 15mA$

$r_z = 20\Omega, I_{z_{min}} = 10mA$

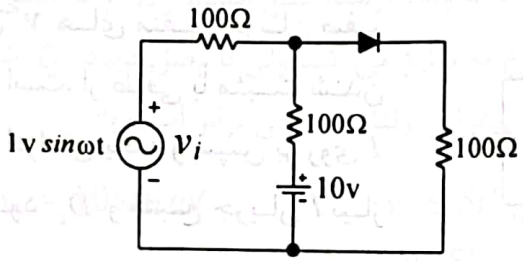
۱۵- با فرض ایده آل بودن دیودها در شکل زیر، منحنی $i(v)$ را ترسیم کنید.



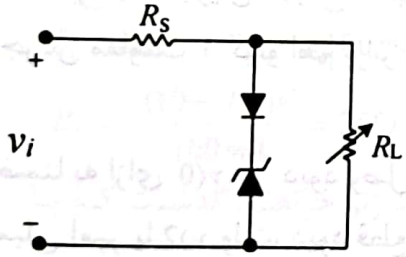
۱۶- با فرض ایده آل بودن دیود، منحنی $v_o(v_i)$ مدار شکل زیر را تعیین و ترسیم کنید.



۱۷- مطلوبست تعیین ولتاژ DC و ac در دو سر دیود، با توجه به اینکه ولتاژ دو سر دیود در جریان ۱ میلی آمپر ۰/۶۲ ولت است.



۱۸- در مدار شکل زیر $V_z = 7.3$ ولت و $V_D = 0.7$ ولت است. اگر $I_{Z_{min}} = 5$ میلی آمپر، مقاومت بار از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم و ولتاژ ورودی از ۱۲ تا ۱۶ ولت تغییر کند، مطلوبست:



الف- مقدار مقاومت R_s بطوریکه ولتاژ خروجی ثابت بماند.

ب- دلیل سری بستن دیود زنر با دیود معمولی.

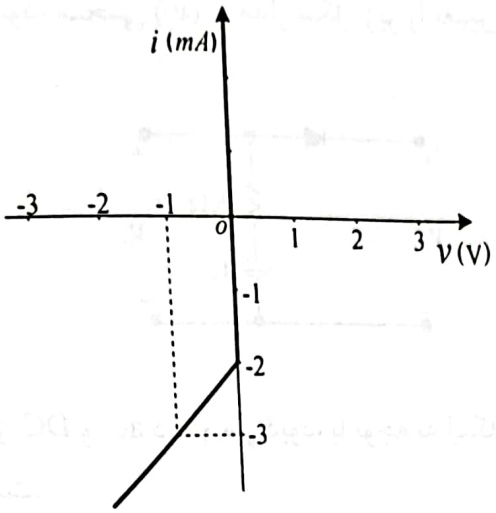
ج- اگر توان قابل تحمل هر یک از دیودها 3/4وات باشد، آیا مشکلی برای مدار بوجود می آید؟

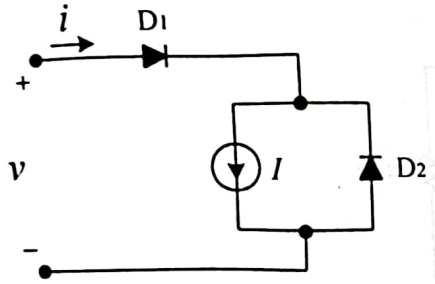
۳.۷ حل تعدادی از مسائل فصل سوم

۱- ج- به ازای $v\langle 0$ ، دیود D قطع است و مدار تنها شامل یک مقاومت ۱ کیلو اهم و منبع جریان است. در نتیجه جریان i به شکل زیر نوشته می شود:

$$i = -2mA + \frac{v}{1K\Omega} \qquad v\langle 0$$

اما هنگامی که $v\rangle 0$ می گردد، دیود اتصال کوتاه شده و جریان به سمت بینهایت میل خواهد کرد. بنابراین با ترسیم جریان ها شکل زیر بدست می آید:





۲- ب- از آنجائیکه به ازای v هـای منفـی جریـان صفـر است، پس به دیود D_1 نیاز است. از طرفی با مثبـت شـدن ولتاژ، جریان بطور ناگهانی افزایش یافته و سپس بر روی I محدود می شود. لذا به دیـود D_2 و منبـع جریـان I نیـاز است.

۴- تا وقتیکه جریان i به ۲ میلی آمپر نرسد، دیود وصل و به شکل اتصال کوتاه عمل خواهد کرد و جریان مقاومت ۱ کیلو اهم برابر است با:

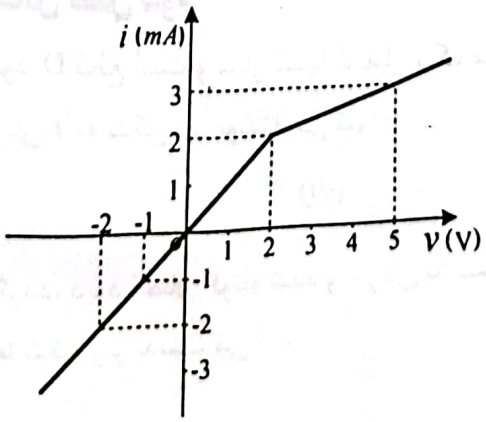
برای $i \le 2mA$ $\qquad i = v/1K\Omega$

ضمنا به ازای $v\rangle 0$ نیز دیود وصل است و جریان با همین شیب ادامه خواهد داشت. اما بـرای $i \ge 2$ میلی آمپر یا $v\rangle 2$ ولت، دیود قطع خواهد بود و جریان مدار برابر است با:

برای $v\rangle 2V$

$$i = 2 + \frac{v - i \times 1K\Omega}{2K\Omega}$$

$$i = \frac{v+4}{3}$$



۵- برای حل این مدارها بهتر است از مدار معادل تونن استفاده شود.

۹- D_1 در گرایش موافق است پس به شکست نمی رسد. از طرفی چون ولتاژ کل اعمال شده ۲۰ ولت است، D_2 نیز به شکست نمی رسد. بنابراین جریان مدار برابر است با:

$$I = I_{S_{D2}} = 1\mu A$$
$$I = I_{S_{D1}}(e^{20V_{D1}} - 1)$$
$$1\mu A = 1nA(e^{20V_{D1}} - 1)$$
$$V_{D1} = 0.345V$$
$$V_{D2} = 19.655V$$

۱۰- دیود D_1 تا هنگامی که v_i به ۵ ولت نرسد، قطع است، D_2 از هنگامی که v_i از دو ولت می گذرد وصل می شود و خازن شروع به شارژ می کند ولی با وصل دیود D_1 شارژ خازن متوقف شده و خازن تا ۳ ولت شارژ می گردد. بنابراین ولتاژ خروجی برابر است با:

برای $v_i \leq 5V$ $\quad v_o = v_i - 3, \ v_i = 10\sin\omega t$

برای $v_i \rangle 5V$ $\quad v_o = -2V$

۱۳-
$$I_{Z_{min}} = 10mA \quad , I_{L_{min}} = 20mA \quad , I_{L_{max}} = 90mA$$
$$I_{R_S} = I_{Z_{min}} + I_{L_{max}} = 100mA$$
$$R_S = \frac{(10 - 7.5)V}{100mA} = 25\Omega$$

اگر بار باز شود، تمام جریان مقاومت R_S یعنی ۱۰۰ میلی آمپر از دیود زنر خواهد گذشت که با توجه به توان قابل تحمل دیود که یک وات است، مشکلی ایجاد نمی کند.

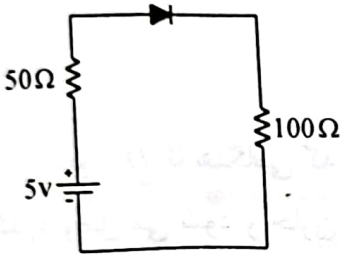
۱۴- برای اینکه ولتاژ خروجی در حدود ۱۰ ولت بماند بهتر است جریان زنر را به ازای کمترین ولتاژ ورودی ۱۰ میلی آمپر در نظر بگیریم:

$$\therefore I_{R_S} = I_{Z_{min}} + I_{L_{max}} = 10mA + 25 \ mA = 35mA$$
$$V_Z = V_{Z0} + I_Z r_Z = 9.7 + 10mA \times 20\Omega = 9.9V \ , V_{Z0} = 9.7V$$
$$I_{R_S} = \frac{14 - 9.9}{R_S} \Rightarrow R_S = 117\Omega$$
$$\text{تنظیم خط} = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = \frac{r_Z}{r_Z + R_S} = \frac{20}{137} = 145 mV/V$$
$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{580mV}{10V} = 5.8\%$$

تنظیم بار $= \frac{\Delta V_o}{\Delta I_L} = -\frac{r_z R_S}{r_z + R_S} = -17 mV/mA$

$\Delta V_o = 145 \times \Delta V_i = 145 \times 4 = 580mV$

۱۷- با فرض کوچک بودن سیگنال ac دو سر دیود، ابتدا مدار را برای محاسبه جریان های DC ترسیم می کنیم. یعنی منبع سیگنال ac را صفر فرض می کنیم. برای ساده کردن محاسبات، مدار معادل تونن آن را طبق شکل زیر بدست می آوریم. سپس جریان مدار را محاسبه می کنیم:



$$I_D = \frac{5 - 0.62}{150} = 29.2mA$$

بنابراین ولتاژ واقعی دو سر دیود برابر است با:

$$v_D = 0.62 + 0.026 \ln \frac{29.2}{1} = 0.707V$$

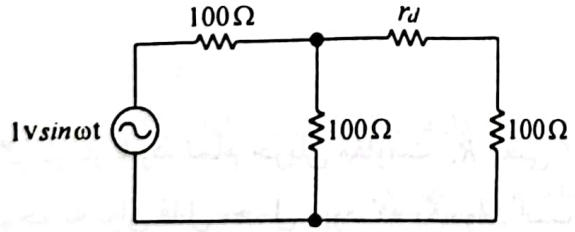
و جریان DC دیود:

$$I_D = \frac{5 - 0.707}{150} = 28.6mA$$

مقاومت دینامیک:

$$r_d = \frac{V_T}{I_D} = \frac{26mV}{28.6mA} = 0.9\Omega$$

اکنون که مقاومت دینامیک دیود معلوم است، ولتاژ ac دو سر آن را با مدار معادل ac زیر بدست می آوریم.



$$i_d = \frac{1V \times 50}{150 \times 100} = 3.33mA$$

$$v_d = 3.33 \times 0.9 = 3.7mV$$

۱۸- الف-

$$V_o = V_Z + V_D = 8V$$

$$I_{L_{min}} = 8mA, I_{L_{max}} = 80mA$$

$$I_{R_s} = I_{L_{max}} + I_{Z_{min}} = 85mA$$

$$R_S = \frac{(12 - 8)}{85mA} = 47\Omega$$

ب- از آنجائیکه ضریب حرارتی دیودهای زنر با ولتاژ شکست بیشتر از $V_Z = 5.2V$ ولت مثبت و ضریب حرارتی دیود معمولی منفی است، انتظار این است که ضریب حرارتی مجموع بهبود یابد. دیگر اینکه اگر جهت ولتاژ ورودی معکوس بسته شود اتفاقی برای مدار رخ ندهد و بالاخره ولتاژ شکست، مجموع آنهاست.

ج-

$$I_{R_L} = \frac{(16-8)}{47} = 170mA$$

$$I_{Z_{max}} = 170 - 8 = 163mA$$

البته بدترین حالت وقتی است که بار قطع شود و تمام جریان ۱۷۰ میلی آمپر از زنر بگذرد، به هر صورت:

$$P_Z = 7.3 \times 170 = 1.24W$$

$$P_D = 0.7 \times 170 = 0.12W$$

برای دیود معمولی خیر، ولی دیود زنر باید ۱/۲۴ واتی باشد.

۴.۴ مسائل فصل چهارم

۱- در یک یکسوسازی نیم موجی از ترانسفورماتوری استفاده شده است که ولتاژ ۲۲۰ ولت ورودی را به ۱۲ ولت کاهش می دهد. مدار یکسوساز را ترسیم کنید. ولتاژ DC ، بازده و ضریب ضربان را در بار یک کیلو اهم هنگامیکه الف- دیود و ترانسفورماتور ایده آل باشند و ب- دیود دارای $r_D = 10$ اهم و سیم پیچ ثانویه ترانس دارای مقاومت $r_t = 20$ اهم باشد حساب کنید.

۲- مدار یکسوساز نیم موجی را ترسیم کنید که ورودی آن یک موج مربعی باشد. اگر $R_L = 1K\Omega$ و $v_D = 0.7$ ولت باشد، به ازای ورودی با دامنه های ۲ ، ۱۰ و ۲۰ ولت شکل موج دو سر مقاومت بار را ترسیم و مقدار ولتاژ DC آن را تعیین کنید. فرکانس را به دلخواه انتخاب کنید.

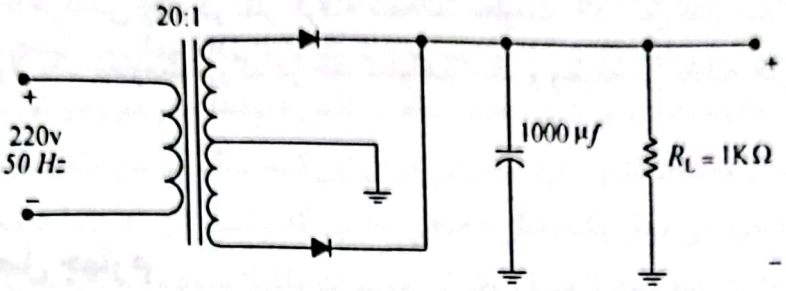
۳- می خواهیم با استفاده از یک یکسوساز تمام موج با دیودهای ایده آل، ولتاژ DC دوازده ولت در دو سر با ۵۰۰ Ω داشته باشیم. نسبت دور ترانس را برای یکسوساز پل و یکسوساز با ترانس سر وسط تعیین کنید. (برق شهر را ۲۲۰ ولت ۵۰ هرتز در نظر بگیرید). ولتاژ شکست دیودها چقدر باشد تا برای استفاده در این مدار مناسب باشند؟

۴- در یکسوساز تمام موجی از دیودها با مقاومت ۱۰ اهم و $v_D = 0.6V$ استفاده شده است. اگر ولتاژ ورودی $v_i = 10\sin\omega t$ باشد، ولتاژ DC دو سر بار ۱۰۰ اهم را برای یکسوساز پل و با ترانس سر وسط بدست آورده و مقدار آن را با حالتی که دیودها ایده آل هستند مقایسه کنید. ضریب ضربان و بازده مدار در هر حالت چقدر است؟ PIV دیودها را بدست آورید. شکل موج دو سر هر دیود را ترسیم کنید.

۵- مدار یکسو ساز نیم موج با صافی خازنی و ولتاژ ورودی $25\sin 314t$ را ترسیم کنید. اگر $R_L = 1K\Omega$ و $C = 470\mu F$ باشد، ولتاژ DC ضریب ضربان، جریان DC بار، اوج جریانی که از دیود می گذرد و PIV دیود را بدست آورید.

۶- در مدار یکسو ساز نیم موج با صافی خازنی، $R_L = 500$ اهم است. اگر قرار باشد ضریب ضربان مدار $1/100$ گردد، چه خازنی لازم است؟ ($f = 50Hz$) . اگر مقدار ولتاژ DC مدار ۶ ولت باشد، دامنه ولتاژ ضربان را بدست آورید.

۷- در مدار یکسو ساز شکل صفحه بعد مقدار ولتاژ DC ، دامنه ولتاژ ضربان و ضریب ضربان را بدست آورید.

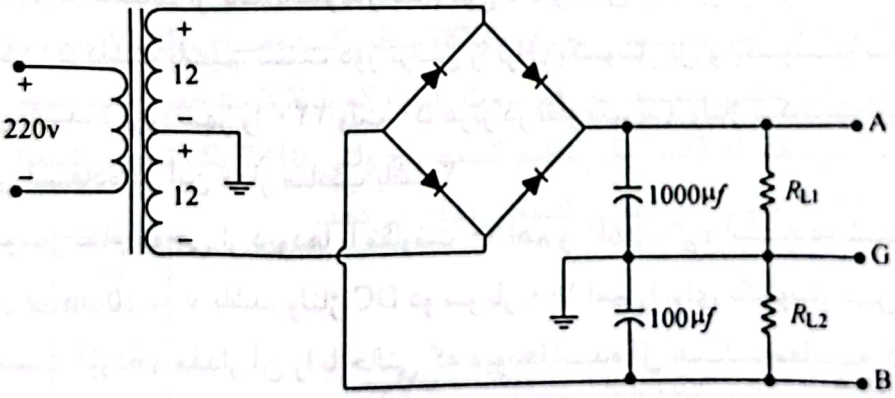


۸- در مدار شکل زیر ولتاژ ثانویه ترانس ۱۲ - ۰ - ۱۲ ولت rms با فرکانس ۵۰ هرتز است، با فرض ایده آل بودن دیودها و ترانس:

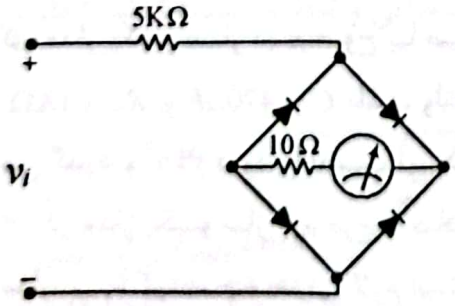
الف- ولتاژ خروجی بدون بار AG و BG را با مشخص کردن جهت ولتاژ تعیین کنید.

ب- هرگاه مقاومت بار بین A و G ، ۱۰۰ اهم باشد، مقدار ولتاژ DC و ضریب ضربان را محاسبه کنید.

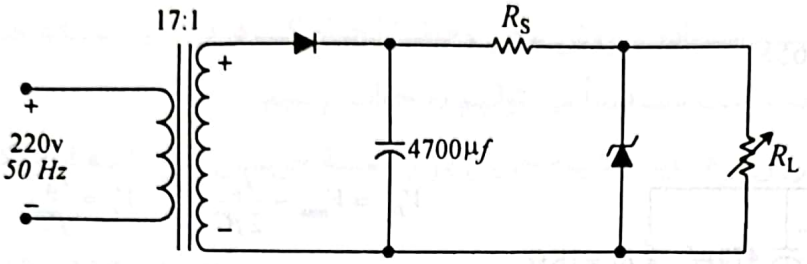
ج- هرگاه مقاومت بار بین B و G یک کیلو اهم باشد، مقدار ولتاژ DC و ضریب ضربان را بدست آورید.



۹- یک آمپر متر DC که می تواند حداکثر ۱۰ میلی آمپر را اندازه بگیرد و مقاومت داخلی آن ۱۰ اهم می باشد، در مدار یک یکسوساز پل طبق شکل قرار گرفته است. هرگاه ولتاژ سینوسی ورودی بطور سری با یک مقاومت ۵ کیلو اهم به مدار وصل شود، حداکثر ولتاژ ac که این ولت متر می تواند اندازه بگیرد، چقدر است؟ دیودها را ایده آل فرض کنید.



۱۰- در مدار تنظیم کننده ولتاژ زیر از یک دیود زنر ۱۲ ولتی با $I_{Z_{min}} = 10$ میلی آمپر استفاده شده است. اگر جریان بار بین ۱۰ تا ۱۰۰ میلی آمپر تغییر کند، مقدار R_S را طوری پیدا کنید که ولتاژ خروجی روی ۱۲ ولت ثابت بماند.

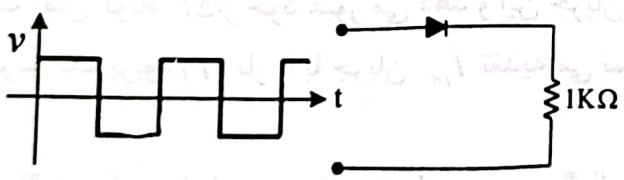


۱۱- در یکسوسازهای با صافی خازنی، آیا محدودیتی در تعیین مقدار خازن وجود دارد؟ شرح دهید.

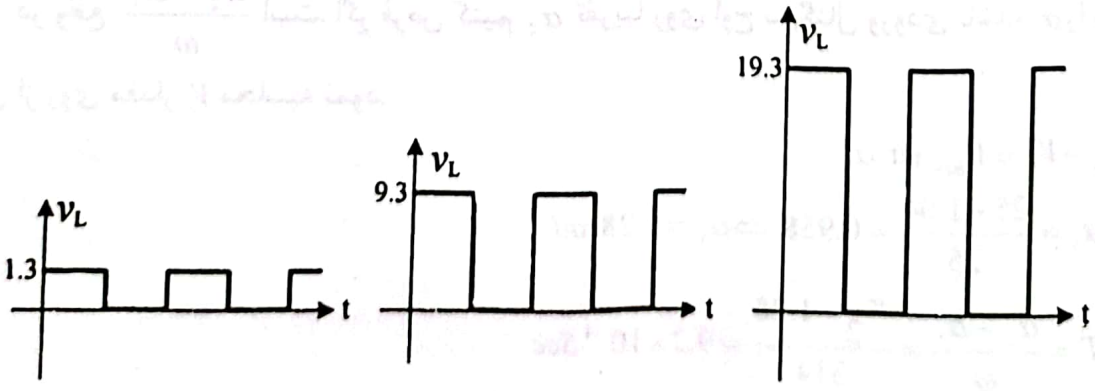
۱۲- مقاومت خروجی یک منبع تغذیه با صافی خازنی چگونه تعریف می شود؟ مقدار آن را در مساله شماره ۱۰ بدست آورید.

۱۳- گاهی در یکسوسازی، خازن های کوچکی در حد پیکو فاراد بطور موازی با دیودها قرار داده می شوند، دلیل بکارگیری این خازن ها را توضیح دهید.

۴.۵ حل بعضی از مسائل فصل چهارم



۲- هنگامی که دامنه ولتاژ ۱۰ یا ۲۰ ولت است، احتمالاً بتوان از افت دو سر دیود صرفنظر کرد و ولتاژ DC را محاسبه نمود. اما در حالت با دامنه ورودی ۲ ولت، نمی توان از ۰/۷ ولت افت دو سر دیود صرفنظر نمود.

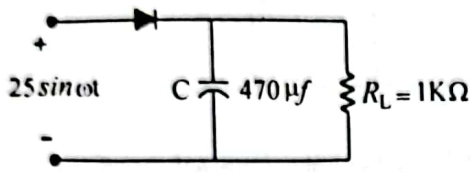


$$V_{DC} = \frac{1}{T}\int_0^{T/2} V dt = \frac{1}{T}\int_0^{T/2} 1.3 dt = \frac{1.3}{2} = 0.65V$$

$$V_{DC} = \frac{9.3}{2} = 4.65V$$

$$V_{DC} = \frac{19.3}{2} = 9.65V$$

-۵



$$V_{DC} = V_{max} - \frac{I_{dc}}{2fC} \quad , \quad V_r = \frac{I_{dc}}{fC}$$

$$V_{DC} = V_{max} - \frac{V_{DC}}{2fCR_L} \quad , \quad V_{max} = 25V$$

$$V_{DC} = \frac{25}{1 + \frac{10^6}{2\times 50\times 470\mu F\times 1000\Omega}} = \frac{25}{1+\frac{1}{47}} = 24.48V$$

$$I_{dc} = 24.48mA \; , \; V_r = \frac{24.48\times 10^3}{50\times 470} = 1.04V$$

$$r = \frac{V_r'}{V_{DC}} = \frac{V_r/2\sqrt{3}}{24.48} = 0.012 \Rightarrow r = 1.2\%$$

برای محاسبه اوج جریان بهتر است اینطور عمل کنیم که دیود در زمان هدایت، جریان I_{peak} را در یک زمان کوتاه ΔT از خود عبور می دهد و این جریان که باعث شارژ خازن می شود، در زمان تقریباً یک پریود (T) بار را با جریان I_{DC} تغذیه می نماید. بنابراین می توان نوشت:

$$I_{peak}.\Delta T = I_{DC}.T$$

که T در یکسوساز نیم موج تقریباً برابر پریود سیگنال ورودی است(در یکسوساز تمام موج نصف زمان پریود خواهد بود).

ΔT در واقع $\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\omega}$ است. اگر فرض کنیم α_2 تقریباً روی اوج سیگنال ورودی باشد، α_1 را می توان از روی مقدار V_r محاسبه نمود.

$$V_{max} - V_r = V_{max}\sin\alpha_1$$

$$\sin\alpha_1 = \frac{25-1.04}{25} = 0.958 \Rightarrow \alpha_1 = 1.28rad$$

$$\therefore \Delta T = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\omega} = \frac{\pi/2 - 1.28}{314} = 9.2\times 10^{-4} Sec$$

$$I_{peak} = \frac{T}{\Delta T} I_{DC} = \frac{1/50}{9.2\times 10^{-4}} \times 24.48 = 532mA$$

و بالاخره،

$$PIV \cong 2V_{max} = 50$$

۱۰- این نوع مسائل بر اساس مقدار خازن صافی، یعنی بر اساس دامنه V_r می تواند با کمینه جریان R_S یا با دقت بیشتر و استفاده از روش سعی وخطا انجام گیرد. در این مسأله چون V_r نسبت به V_{max} خیلی کوچک است مستقیماً می توانیم به جواب برسیم.

بنابراین حداقل جریان R_S باید بیشینه جریان بار و کمینهٔ جریان زنر را به ازای کمترین ولتاژ خازن تامین نماید.

$$I_{R_S} = 100 + 10 = 110mA$$

$$V_{C_{max}} = \frac{220\sqrt{2}}{17} = 18.3V$$

$$V_{C_{min}} = 18.3 - V_r \ , V_r = \frac{I_{dc}}{fC} = \frac{110mA \times 10^{-3} \times 10^{+6}}{50 \times 4700} = 0.47V$$

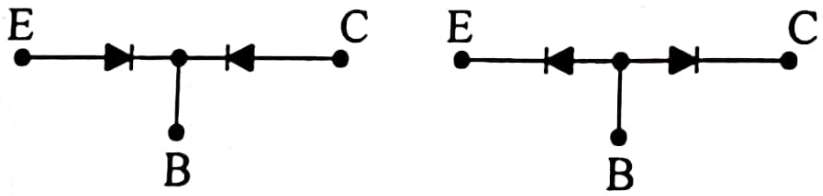
$$\therefore V_{C_{min}} = 18.3 - 0.47 = 17.83$$

$$R_S = \frac{(17.83 - 12)}{110mA} = 53\Omega$$

۵.۱۴ مسائل فصل پنجم

۱- طرز کار یک ترانزیستور دو قطبی را شرح دهید.

۲- ترانزیستور دو قطبی در واقع از اتصال دو پیوند PN و NP ساخته می شود. اگر پیوندهای PN را طبق شکل بهم متصل کنیم، ترانزیستور بوجود می آید؟ شرح دهید.



PNP NPN

۳- بازده تزریق امیتر را شرح دهید و چگونگی افزایش آن را بیان نمائید.

۴- کاهش پهنای فعال بیس چه اثری در عملکرد ترانزیستور دارد؟

۵- کنترل کنندهٔ واقعی در ترانزیستور کدام پایانه است؟ چرا؟

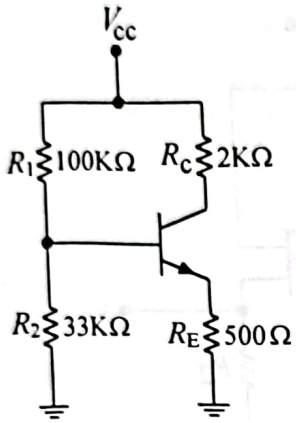
۶- منحنی مشخصه خروجی یک ترانزیستور PNP در حالت بیس مشترک را با دقت ترسیم کنید. فرض کنید $\beta = 100$ باشد.

۷- مدار یک تقویت کنندهٔ امیتر مشترک NPN را ترسیم ویک مقدار تقریبی برای اجزا آن در نظر بگیرید.

۸- مدار یک تقویت کنندهٔ بیس مشترک PNP را ترسیم و مقدار تقریبی برای اجزا آن در نظر بگیرید.

۹- مناطق فعال، قطع و اشباع یک ترانزیستور را مشخص کنید.

۱۰- مطلوبست تعیین جریان و ولتاژ نقطهٔ کار ترانزیستور در مدار شکل زیر در صورتیکه $V_{BE} = 0.7$ولت، $\beta = 200$ و $I_{CO} = 0$ باشد.

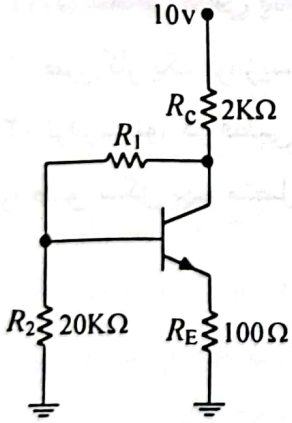


۱۱- ترانزیستوری که جریان امیتر آن به ازای 0.65 ولت، 2 میلی آمپر است، در صورتیکه n=1 باشد، جریان اشباع معکوس پیوند امیتر- بیس آن چقدر است؟

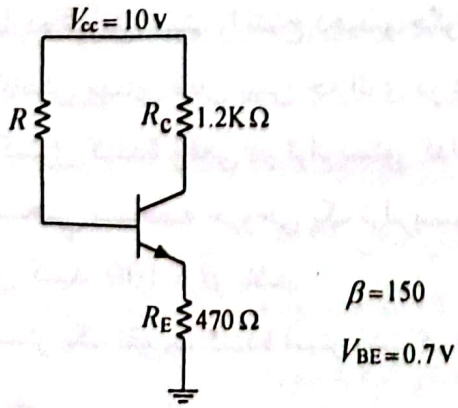
۱۲- دو ترانزیستور NPN موجود است. اگر به ازای $V_{BE} = 0.67$ ولت، جریان امیتر یکی 2 میلی آمپر و دیگری 10 میلی آمپر باشد، فکر می کنید این اختلاف جریان از چه تفاوتهایی در این دو ترانزیستور ناشی شده است؟

۱۳- مقدار R_1 در مدار شکل زیر را طوری تعیین کنید که $V_{CE_Q} = 5$ ولت گردد.

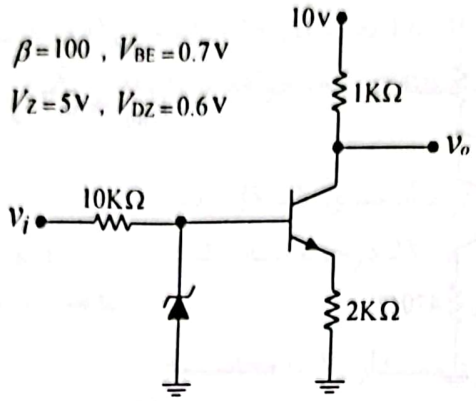
$\beta = 200$ و $V_{BE} = 0.7$.



۱۴- مقدار R در مدار زیر چقدر باشد تا ترانزیستور به منطقهٔ اشباع نرسد؟

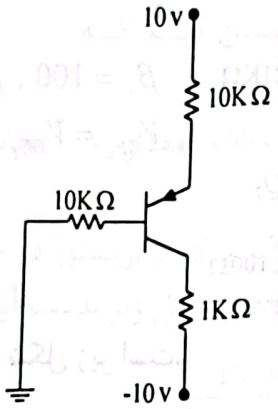


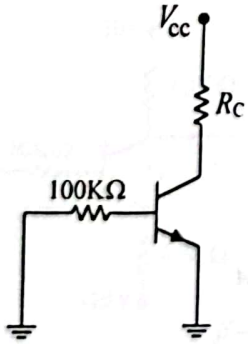
۱۵- مشخصهٔ $v_o(v_i)$ مدار شکل زیر را ترسیم کنید. محدودهٔ ولتاژ v_i چگونه تعیین می شود؟



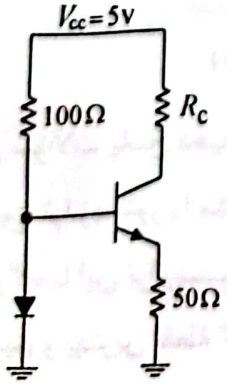
۱۶- جریان و ولتاژ نقطهٔ کار ترانزیستور در مدار شکل زیر را بدست آورید.

$V_{BE} = 0.7$ و $\beta = 50$



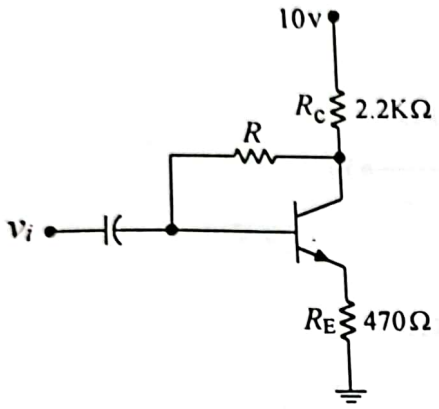


۱۷- اگر I_{CBO} ترانزیستور در مدار شکل زیر و در دمای 25 درجه سانتیگراد، 10 نانو آمپر باشد، در چه دمایی ترانزیستور شروع به هدایت می کند؟



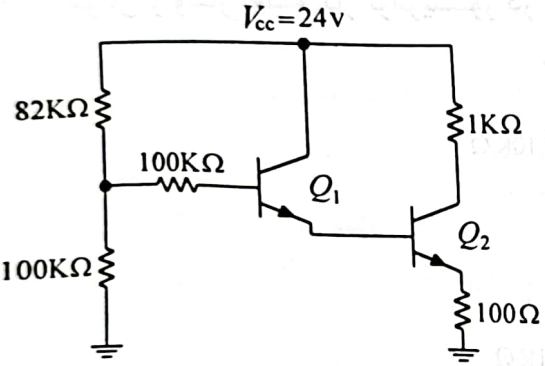
۱۸- جریان مقاومت ها در شکل زیر را بدست آورید. ولتاژ دو سر دیود در جریان $I_D = 1$ میلی آمپر، $V_D = 0.7$ ولت و در مورد ترانزیستور $\beta = 100$ و $V_{BE} = 0.7$ ولت است.

۱۹- مدار شکل زیر مفروض است. نقش مقاومت R را توضیح دهید. مقدار R چقدر باشد تا $V_{CE} = 4$ ولت گردد؟



$V_{BE} = 0.7$ و $\beta = 100$

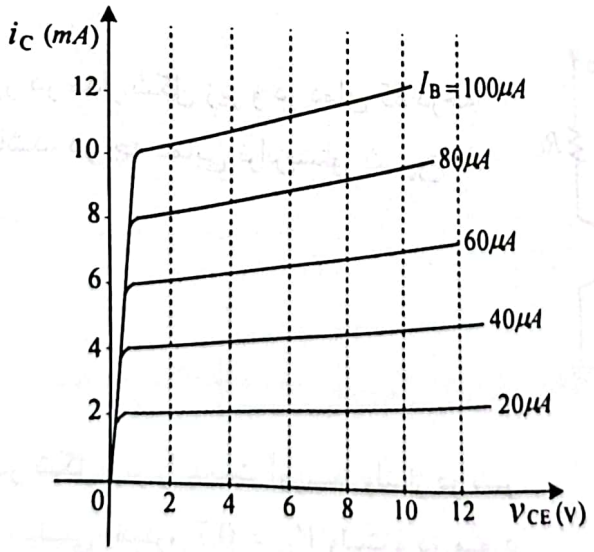
۲۰- مطلوبست تعیین مقدار ولتاژ v_o در شکل رو به رو.



$\beta_1 = 100$, $\beta_2 = 50$

$V_{BE_1} = V_{BE_2} = 0.7V$

۲۱- مشخصهٔ خروجی ترانزیستوری به شکل زیر است،



به این سؤالات پاسخ دهید:

الف) نوع ترانزیستور را مشخص کنید.

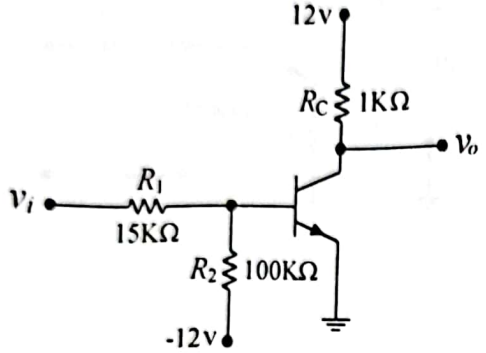
ب) هرگاه با این ترانزیستور مداری بسازیم که $V_{CC} = 12$ ولت و $R_C = 1K\Omega$ باشد، خط بار DC را ترسیم و بهترین نقطهٔ کار آن را تعیین کنید.

ج) مقدار β در نقطهٔ کار چقدر است؟

د) اگر از مقاومت های R_1 و R_2 برای تامین گرایش استفاده شود، مقدار آنها برای چنین نقطه کاری چقدر است؟

ه) اگر مقاومت R_E به مقدار $1K\Omega$ که دارای خازن انشعابی (بای پاس) بزرگ است به مدار اضافه کنیم، در آن صورت بهترین نقطهٔ کار کجا خواهد بود؟ مقدار R_1 و R_2 در این حالت بهتر است چقدر باشد؟

۲۲- اگر کمینهٔ مقدار β در ترانزیستور شکل زیر 30 و جریان $I_{CBO} = 10nA$ در 25 درجهٔ سانتیگراد باشد، مطلوبست:



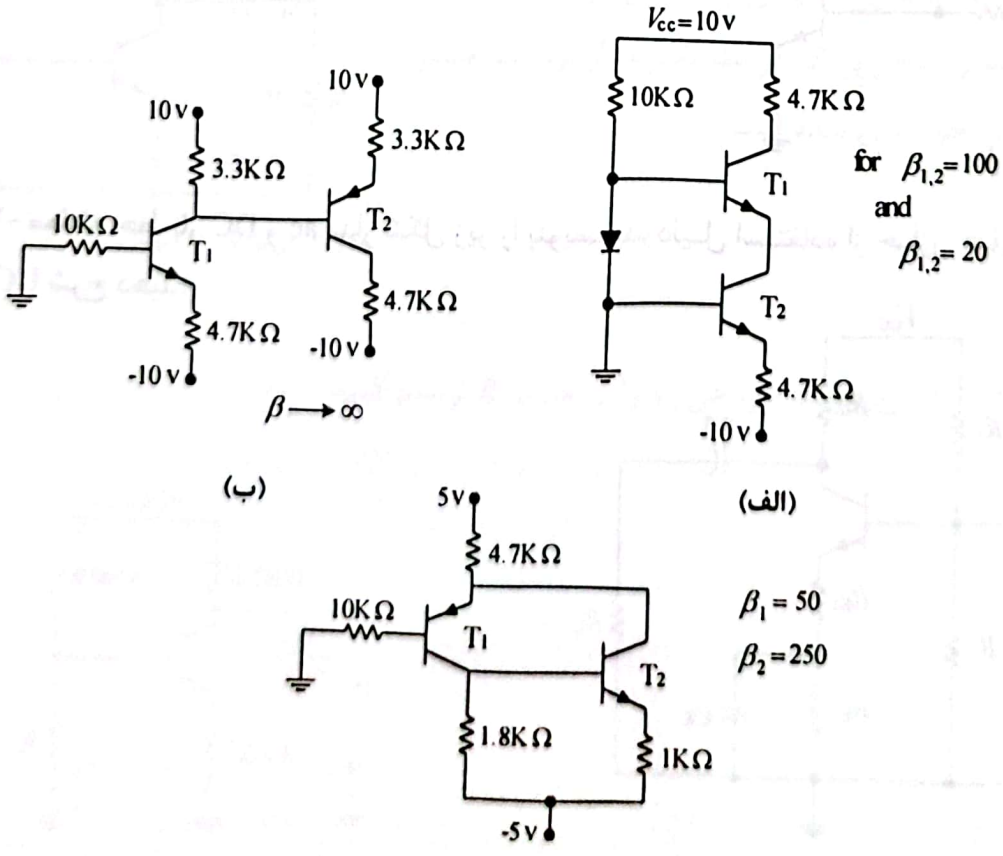
الف) به ازای $v_i = 12V$ مقدار v_o را محاسبه نموده و نشان دهیدکه مدار در اشباع است $(V_{CE_{sat}} = 0.1V)$.

ب)کمینه مقدار R_1 را طوری تعیین کنید که ترانزیستور وارد منطقه فعال شود.

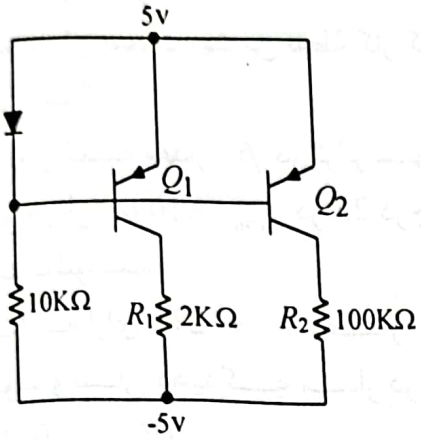
ج) اگر $R_1 = 15K\Omega$ و $V_i = 1$ ولت باشد، مقدار v_o را محاسبه نموده و نشان دهید که ترانزیستور در حالت قطع است.

د) حداکثر دمای محیط را محاسبه کنید که ترانزیستور در حالت C همچنان در قطع باقی بماند.

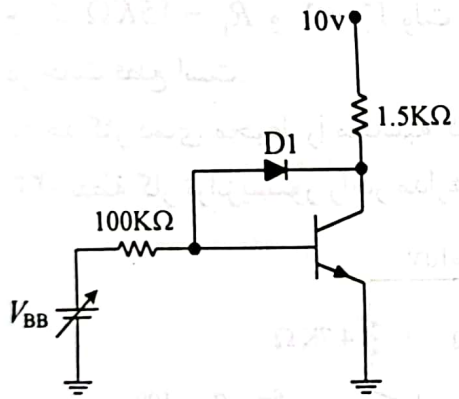
۲۳- نقطهٔ کار ترانزیستور را در مدارهای شکل زیر بدست آورید. $V_{BE} = 0.7$ ولت.



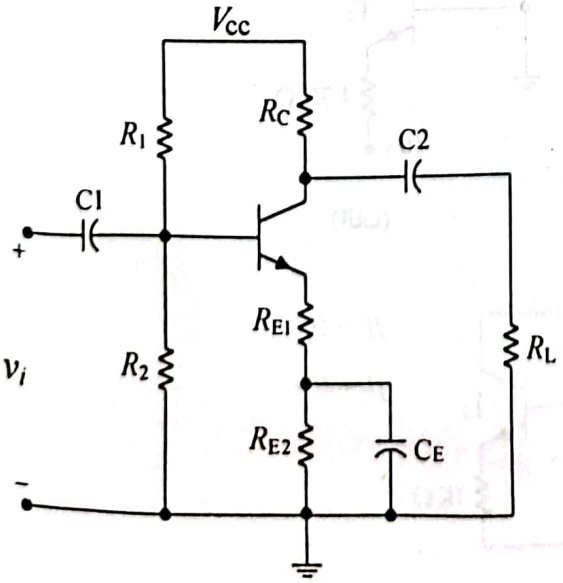
۲۴- مدار شکل زیر مفروض است. اگر $V_{BE} = 0.7$ ولت و ترانزیستورها کاملاً مشابه باشند، جریان مقاومتهای R_1 و R_2 را بدست آورید. دیود D_1 را مشابه دیود بیس - امیتر ترانزیستور در نظر بگیرید. β به اندازهٔ کافی بزرگ است.



۲۵- در صورتیکه دیود D_1 در مدار شکل زیر از جنس ژرمانیم باشد، $V_D = 0.2V$ ، به ازای چه جریان بیسی، دیود D_1 شروع به هدایت خواهد کرد؟



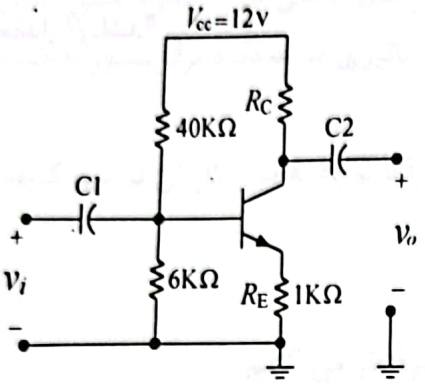
۲۶- معادله خط بار DC و ac مدار شکل زیر را بنویسید. دلیل استفاده از خازن های C_1، C_2 و C_E را شرح دهید.



۲۷- در مدار شکل زیر مقدار مقاومت R_C را طوری بدست آورید که حداکثر سیگنال متقارن در خروجی حاصل گردد. اگر مقاومت $R_L = 1K\Omega$ را به خروجی مدار متصل کنیم، حداکثر سیگنال متقارن در خروجی چقدر خواهد بود؟ ترانزیستور به شکل خطی بین اشباع و قطع عمل می کند.

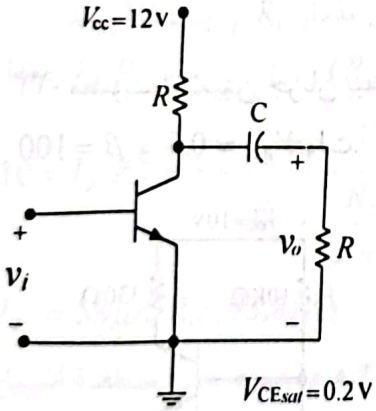
$V_{BE} = .06V, \beta = 100, V_{CE_{sat}} = 0.2V$

C_1 ، C_2 به اندازهٔ کافی بزرگ هستند.

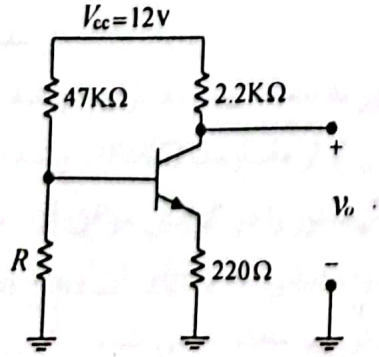


۲۸- ولتاژهای شکست چند ترانزیستور دلخواه را از روی کاتالوگ بخوانید و در مورد آنها بحث کنید.

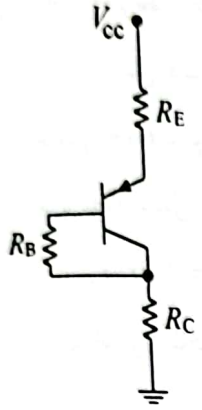
۲۹- در مدار شکل زیر، اگر ترانزیستور بین قطع و اشباع خطی عمل کند، نقطهٔ کار ترانزیستور را طوری تعیین کنید که بیشینهٔ دامنهٔ متقارن خروجی v_o حاصل گردد.
خازن را به اندازهٔ کافی بزرگ در نظر بگیرید. از ترسیم مدار تأمین گرایش خودداری شده است.



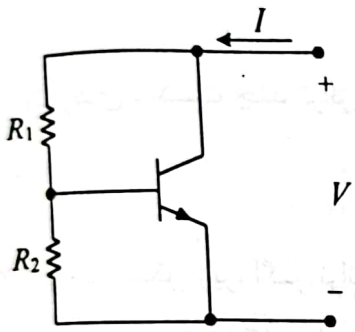
۳۰- در مدار شکل زیر، ولتاژ خروجی v_o را بر حسب R ترسیم کنید.



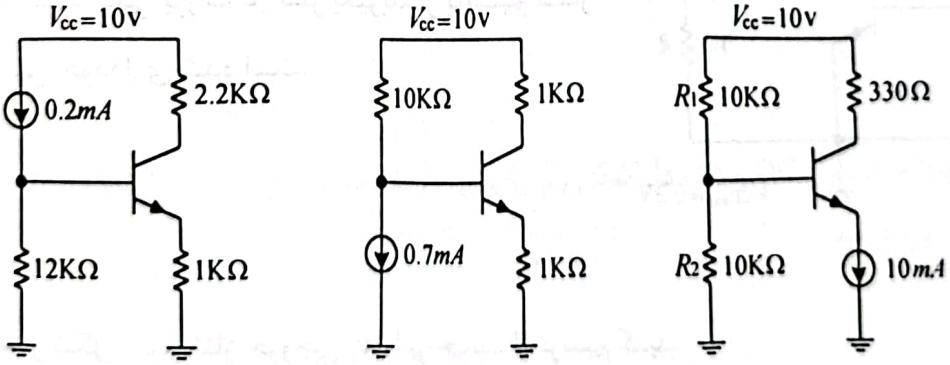
۳۱-چه شرطی در عناصر مدار شکل زیر برقرار باشد تا جریان و ولتاژ نقطهٔ کار تقریباً مستقل از مقدار β باشد؟



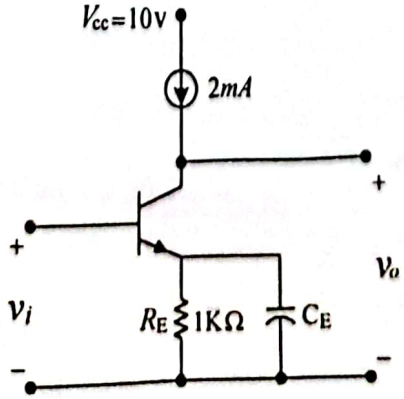
۳۲- مدار شکل رو به رو مفروض است، ولتاژ V را بر حسب V_{BE} ترانزیستور بدست آورید. آیا می توان کاربرد ویژه ای برای این مدار بیان کرد؟ چه شرایطی لازم است تا این مدار کاربرد ویژه ای داشته باشد؟



۳۳- مطلوبست تعیین جریان بیس و کلکتور در مدارهای شکل زیر.
$\beta = 100$ و $V_{BE} = 0.6$ ولت.



۳۴- مطلوبست ترسیم خط بار DC در مدار شکل زیر. برای ترانزیستور یک منحنی فرضی ترسیم کنید.



۳۵- اگر در یک ترانزیستور معمولی از پایهٔ کلکتور بجای امیتر و بالعکس استفاده شود، عملکرد ترانزیستور چگونه خواهد بود؟ آیا اینگونه بکارگیری ترانزیستور اسم خاصی دارد؟ چگونه می توان ترانزیستوری ساخت که جابه جایی پایانه های کلکتور و امیتر تاثیری در عملکرد ترانزیستور نداشته باشد؟ عملکرد چنین ترانزیستوری چگونه خواهد بود؟

۳۶- منحنی مشخصهٔ $i_e(v_E)$ یک ترانزیستور تک پیوندی را با توجه به طرز کار آن ترسیم کنید.

۵.۱۵ حل بعضی از مسائل فصل پنجم

۱۳- با توجه به اینکه β بزرگ است، ابتدا از جریان بیس صرفنظر می کنیم.

$$I_{R_1}R_1 + V_{BE} = V_{CE_Q} \quad ,(I_{R_1} - I_B)R_2 = V_{BE} + I_E R_E$$

$$I_{R_1}R_2 = V_{BE} + I_E(R_E + \frac{R_2}{\beta+1})$$

$$10 = (I_C + I_{R_1})R_C + V_{CE_Q} + I_E R_E$$

با بزرگ بودن β، $I_C = I_E$ بوده، در نتیجه رابطهٔ سوم می تواند به شکل زیر نوشته و با استفاده از رابطهٔ دوم و سوم، I_{R_1} را محاسبه و سپس با گذاشتن در رابطهٔ اول مقدار R_1 را بدست آوریم.

$$10 = I_{R_1}R_C + V_{CE_Q} + I_E(R_E + R_C)$$

$$10 = I_{R_1}R_C + 5 + \frac{I_{R_1}R_2 - V_{BE}}{R_E + \frac{R_2}{\beta+1}}(R_E + R_C) \Rightarrow 5 = 2I_{R_1} + \frac{20I_{R_1} - 0.7}{0.2}(0.1+2)$$

$$I_{R_1} = 58\mu A, R_1 = 73.8K\Omega$$

۱۴- دقت کنید که منطقهٔ اشباع ترانزیستور با اشباع مدار اشتباه گرفته نشود. مرز منطقهٔ اشباع ترانزیستور هنگامی است که $V_{CB} = 0$، یعنی $V_{CE} = V_{BE} = 0.7$ ولت گردد. بنابراین خواهیم داشت:

$$I_B R = I_C R_C$$

$$R = \beta R_C = 150 \times 1.2K\Omega = 180K\Omega$$

اما اگر اشباع مدار گفته شود، در آن صورت V_{CE} به کمترین مقدار خود یعنی $V_{CE_{sat}}$ خواهد رسید که مدار با مقادیر جدید محاسبه خواهد شد.

۱۷- I_{CBO} جریانی است که در یک ترانزیستور NPN از کلکتور به سمت بیس جاری خواهد شد بویژه هنگامی که ترانزیستور قطع است. در این مدار با عبور I_{CBO} از مقاومت $100K\Omega$ ولتاژی در دو سر آن ایجاد می شود که سعی دارد پیوند بیس- امیتر ترانزیستور را در گرایش موافق قرار دهد. از آنجائیکه I_{CBO} با افزایش هر ده درجه در دما دو برابر می شود، دمایی که به ازای آن پیوند بیس- امیتر به اندازهٔ 0.7 ولت در گرایش موافق قرار می گیرد، به شکل زیر محاسبه می شود:

$$100 \times I_{CBO}(T_2) = 0.7V$$

$$I_{CBO}(T_2) = 7 \times 10^{-6}\, A$$

$$I_{CBO}(T_2) = I_{CBO}(T_1)2^{\Delta T/10}\ ,\ \Delta T = 94.5^{\circ}C$$

$$T_2 = 119.5^{\circ}C$$

۱۸- ابتدا فرض می کنیم که ولتاژ دو سر دیود 0.7 ولت باشد، با صرفنظر کردن از جریان بیس، جریان دیود برابر خواهد بود با:

$$I_D = \frac{5 - 0.7}{0.1K\Omega} = 43\,mA$$

از آنجائیکه جریان عبوری از دیود نسبتاً زیاد است، فرض کوچک بودن جریان بیس درست است. اکنون که حدود جریان دیود معلوم است، با فرض مسأله ولتاژ دو سر دیود را بدست می آوریم.

$$V_D = V_D(I_D = 1mA) + V_T \ln\frac{I_D}{1mA} = 0.7 + 0.026\ln\frac{43}{1}$$

$$V_D = 0.8V$$

از آنجائیکه با $V_D = 0.8$ ولت، جریان I_D تغییر زیادی نمی کند، کار را با در نظر گرفتن $V_D = 0.8$ ولت ادامه می دهیم.

$$I_{100\Omega} = 42\,mA$$

$$I_E = I_{50\Omega} = \frac{0.8 - 0.7}{50\Omega} = 2\,mA$$

$$I_C = I_{R_C} = 1.98$$

۱۹- مقاومت R مشابه R_E نقش پس خور را دارد. همانطوریکه R_E اثر تغییر دما را تا حدی خنثی می کرد، R نیز می تواند نقش مشابه ای انجام دهد. بعنوان مثال اگر دما زیاد شود، جریان کلکتور افزایش می یابدکه باعث افزایش افت R_C و در نتیجه کاهش ولتاژ کلکتور می گردد. کاهش ولتاژ کلکتور باعث می شود که جریان مقاومت R که در واقع جریان بیس است کاهش یابد که خود موجب کاهش I_C می گردد، بنابراین مانع افزایش I_C با دما می گردد. محاسبه مقدار R مشابه مساله ۱۳ است.

۲۲- الف) برای محاسبهٔ جریان اشباع مدار معمولاً از I_{CBO} صرفنظر می شود، زیرا جریان بیس باید به اندازهٔ کافی بزرگ باشد. در اشباع ترانزیستور نیز می توانیم فرض کنیم که V_{BE} همچنان 0.7 ولت است.

$$I_{15K\Omega} = \frac{12 - 0.7}{15K\Omega} = 0.753\,mA$$

$$I_B = 0.753 - \frac{0.7 - (-12)}{100K\Omega} = 0.626\,mA$$

حتی با کمترین مقدار β، جریان کلکتور برابر است با:

$$I_C = \beta I_B = 30 \times 0.626 = 18.75mA$$

که افت R_C خیلی بیشتر از منبع تغذیه 12 ولت است، جریان اشباع این مدار برابر است با:

$$I_{C_{sat}} = \frac{V_{CC} - V_{CE_{sat}}}{R_C} = \frac{12 - 0.1}{1K\Omega} = 11.9mA$$

بنابراین مدار در اشباع است.

ب) اگر منطقهٔ فعال ترانزیستور را از $V_{CE_{sat}}$ تا V_{CC} در نظر بگیریم(البته اصل منطقهٔ فعال ترانزیستور آنجایی تعریف می شود که پیوند بیس- امیتر گرایش موافق ولی پیوند کلکتور- بیس گرایش مخالف داشته باشد، ولی در عمل اغلب از ترانزیستور به عنوان تقویت کنندهٔ خطی بین $V_{CE_{sat}}$ تا V_{CC} استفاده می شود). بنابراین باید جریان بیسی محاسبه شود که ترانزیستور تنها به مرز اشباع برسد، که البته مقدار R_1 باید بیشتر از این مقدار باشد تا مدار اشباع نگردد، بنابراین کمینهٔ مقدار R_1 برابر است با:

$$I_{B_{sat}} = \frac{I_{C_{sat}}}{\beta} = \frac{11.9}{30} = 0.4mA$$

$$I_{B_{sat}} = \frac{12 - 0.7}{R_1} - \frac{0.7 - (-12)}{100K\Omega} = 0.4 \Rightarrow R_1 = 21.5K\Omega$$

ج) حداقل ولتاژ V_i لازم برای اینکه جریان مقاومت $100K\Omega$ را تامین کند برابر است با:

$$\frac{V_i}{15K\Omega} = \frac{12}{100K\Omega} \Rightarrow V_i = 1.8V$$

بنابراین $V_i = 1$ ولت به هیچ وجه نمی تواند موجب هدایت ترانزیستور گردد و $V_o = 12V$ ولت خواهد بود.

د) همچنان در قطع بودن را می توان با $V_{BE} = 0$ولت یا حتی $V_{BE} = 0.6$ ولت محاسبه کرد زیرا در اکثر مدارهای ترانزیستوری فرض بر این است که ترانزیستور با V_{BE} بیشتر از 0.6 یا 0.7 ولت هدایت خواهد کرد. البته از نظر فیزیکی ترانزیستور هنگامی قطع است که هر دو پیوند آن گرایش معکوس داشته باشند و یا اینکه به مرز صفر ولت برسد.

اگر باقی ماندن در قطع را $V_{BE} = 0$ ولت در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$I_{CB_O} + \frac{V_i - 0}{15K\Omega} = \frac{12}{100K\Omega}$$

$$I_{CB_O} = 0.12 - \frac{1V}{15K\Omega} = 0.053mA$$

$$I_{CB_O}(T_2) = I_{CB_O}(T_1)2^{\Delta T/10}$$

$$\Delta T = 123.7^{\circ C} \quad , T_2 = 148.7^{\circ C}$$

۲۴- از آنجائیکه دیود کاملاً مشابه پیوند بیس- امیتر است، بنابراین با معلوم بودن جریان دیود، جریان امیتر ترانزیستورها نیز همان مقدار را خواهد داشت.

$$I_{E_1} = I_{E_2} = I_D = \frac{10 - 0.7}{10K\Omega} = 0.93mA$$

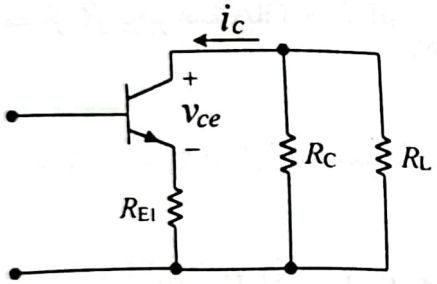
با این مقدار جریان ترانزیستور Q_1 مشکلی ندارد و جریان R_1 نیز تقریباً همان 0.93mA است، اما Q_2 با این جریان اشباع می شود بنابراین جریان R_2 باید از راه دیگری محاسبه شود.

$$I_{R_2} = \frac{10 - V_{CE_{sat}}}{100K\Omega} = \frac{9.9V}{100K\Omega} = 0.099\,mA$$

۲۶- در معادلهٔ خط بار DC خروجی تمام عناصری که در مسیر جریان DC کلکتور قرار دارند در نظر گرفته می شوند که معادله به شکل زیر در می آید:

$$V_{CC} = i_C(R_C + R_{E_1} + R_{E_2}) + v_{CE}$$

اما برای نوشتن خط بار ac خروجی، ابتدا مدار معادل ac طبق شکل زیر ترسیم می شود و سپس رابطهٔ i_C با v_{CE} نوشته می شود.



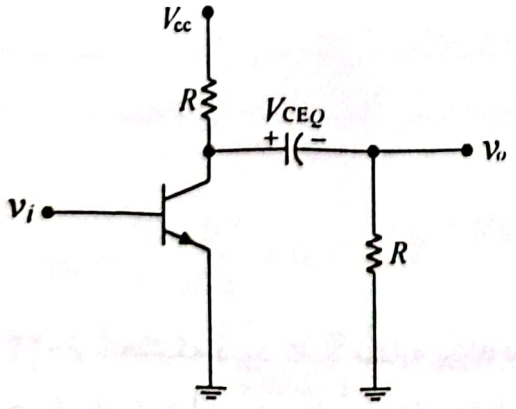
$$V_{CC} = -i_C(R_{E_1} + R_C \| R_L)$$

و سپس با تبدیل پارامترهای سیگنال ac به سیگنال متغیر، معادلهٔ خط بار ac به شکل زیر بدست می آید.

$$V_{CE} - V_{CE_Q} = -(i_C - I_{C_Q})(R_{E_1} + R_C \| R_L)$$

وظیفهٔ خازنها نیز در کتاب تشریح شده اند.

۲۹- از خط بار DC و ac برای تعیین بهترین نقطهٔ کار، به قدر کافی در کتاب بحث شد. کافی است معادلات خط بار نوشته شوند و سپس به ازای $v_{CE} = V_{CE_{sat}}$ جریان i_C برابر $2I_{C_Q}$ انتخاب گردد. به شکل ساده زیر نیز می توان بهترین نقطهٔ کار را بدست آورد. اگر رفتار ترانزیستور بین اشباع و قطع خطی باشد، $V_{O_{max}}$ و $V_{O_{min}}$ را می توان طوری بدست آورد که $V_{O_{max}} = |V_{O_{min}}|$ گردد. یعنی بیشینهٔ و کمینهٔ سوئینگ ولتاژ خروجی حول نقطهٔ کار ماکزیمم و متقارن باشد. اگر شارژ خازن C در نقطهٔ کار همان V_{CE_Q} باشد، طبق شکل زیر، ولتاژ خروجی را می توان به ازای دو حالت قطع و اشباع ترانزیستور محاسبه نمود.



$$V_{O_{max}} = \frac{V_{CC} - V_{CE_Q}}{2R} \times R = \frac{1}{2}(V_{CC} - V_{CE_Q})$$

و به هنگام اشباع ترانزیستور:

$$|V_{O_{min}}| = V_{CE_Q} - V_{CE_{sat}}$$

بهترین نقطهٔ کار جایی است که:

$$|V_{O_{max}}| = |V_{O_{min}}|$$

$$\frac{1}{2}(V_{CC} - V_{CE_Q}) = V_{CE_Q} - V_{CE_{sat}}$$

$$\frac{3}{2}V_{CE_Q} = \frac{1}{2}V_{CC} + V_{CE_{sat}}$$

$$V_{CE_Q} = \frac{2}{3}(\frac{V_{CC}}{2} + V_{CE_{sat}}) = \frac{2}{3}(6 + 0.2) = 4.13V$$

۳۲- برای اینکه این مدار کار واقعی خود را انجام دهد، لازم است که R_1 و R_2 طوری انتخاب شوند که جریان آنها خیلی بیشتر از جریان بیس باشد. با قبول این شرط و صرفنظر کردن از جریان بیس خواهیم داشت:

$$V = \frac{V_{BE}}{R_2}(R_1 + R_2)$$

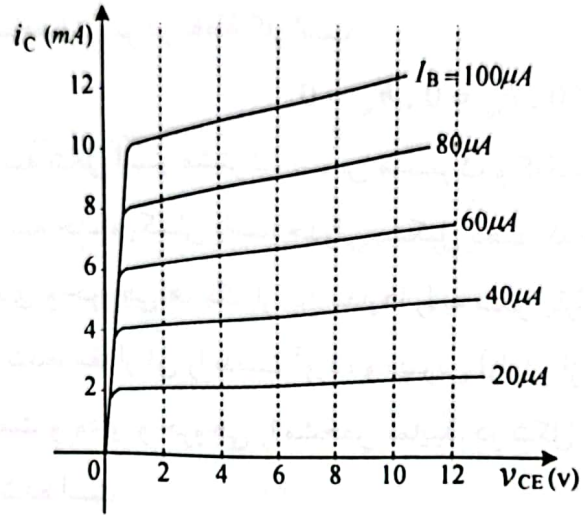
$$V = (1 + \frac{R_1}{R_2})V_{BE}$$

با هر نسبتی که $\frac{R_1}{R_2}$ داشته باشند، V مضربی از V_{BE} است، به همین جهت به این مدار ضرب کنندهٔ V_{BE} گفته می شود. از این مدار معمولاً بعنوان دیود زنر نیز می توان استفاده کرد زیرا با تغییر جریان I (البته در یک حد از پیش تعیین شده) ولتاژ V ثابت باقی می ماند. به عبارت دیگر $\frac{dV}{dI}$ که مقاومت خروجی این مجموعه است، بسیار کوچک می باشد و همچون یک دیود زنر تغییر جریان موجب تغییر ولتاژ آن نمی گردد.

که مشابه مقاومت خروجی در امیتر مشترک است.

۶.۶ مسائل فصل ششم

۱- منحنی مشخصهٔ خروجی ترانزیستور در شکل زیر ارائه شده است، به سئوالات مربوطه پاسخ کامل دهید.



الف) نوع ترانزیستور را مشخص کنید.

ب) هرگاه با این ترانزیستور مداری بسازیم که $V_{CC} = 12$ ولت و $R_C = 1$ کیلو اهم باشد، خط بار DC را ترسیم و بهترین نقطهٔ کار آن را تعیین کنید.

ج) مقدار β در نقطهٔ کار چقدر است؟

د) پارامترهای h_{fe} و h_{oe} را حول نقطهٔ کار بدست آورید.

ه) چگونه می توان h_{re} و h_{ie} را در نقطهٔ کار تعیین کرد؟

و) هرگاه جریان بیس ترانزیستور به شکل $i_b = 20\mu A \sin \omega t$ تغییر کند، شکل موج جریان و ولتاژ کلکتور را با ترسیم، تعیین کرده و بهرهٔ ولتاژ و جریان مدار را بدست آورید.

ز) اگر از مقاومت های R_1 و R_2 برای تامین گرایش ترانزیستور استفاده شود، مقدار آنها برای چنین نقطهٔ کاری چقدر است؟

ح) اگر مقاومت R_E به مقدار ۱ کیلو اهم که دارای خازن موازی C_E بزرگ است به مدار اضافه کنیم، در آن صورت بهترین نقطهٔ کار کجا خواهد بود؟ سپس سئوالات "و" و "ز" را تکرار کنید.

۲- با توجه به مشخصات نقطهٔ کار تعیین شده در مسئله اول، پارامترهای مدل هایبرید π این ترانزیستور را تعیین کنید.

۳- پارامترهای هایبرید بیس مشترک را بر حسب امیتر مشترک و کلکتور مشترک بدست آورید.

۴- اگر جریان نقطهٔ کار ترانزیستوری ده برابر تغییر کند، کدامیک از پارامترهای هایبرید بیشترین تغییرات را خواهند داشت؟ شرح دهید.

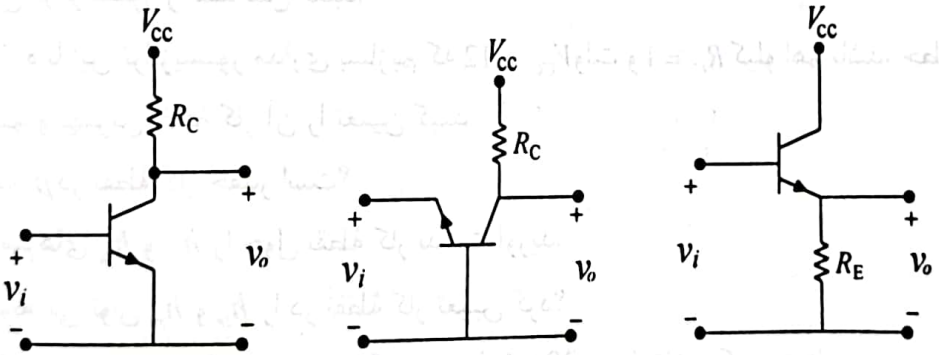
۵- کدامیک از پارامترهای هایبرید بیشترین تغییرات را خواهند داشت اگر v_{CE} پنج برابر تغییر کند؟

۶- سئوال ۴ و ۵ را برای مدل هایبرید π تکرار کنید.

۷-ترانزیستوری دارای مشخصات زیر در نقطهٔ کار است:

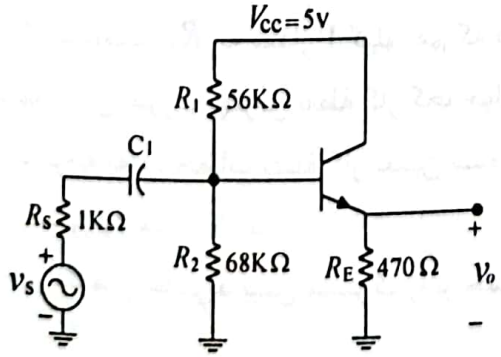
$h_{ie} = 1200\Omega$, $h_{fe} = 150$, $h_{re} \approx 0$, $h_{oe} \approx 0$

هرگاه این ترانزیستور به سه شکل امیتر مشترک، بیس مشترک و کلکتور مشترک بسته شود بطوریکه نقطهٔ کار در هر سه حالت یکسان باشد، جدولی تشکیل دهید که بهرهٔ ولتاژ، بهرهٔ جریان، بهرهٔ قدرت، مقاومت ورودی و خروجی هر یک از این مدارها را به شکل پارامتری نشان دهد. سپس با استفاده از مقادیر داده شده، مقدار آن را بدست آورده و بهترین آرایش از نظر بهرهٔ ولتاژ، بهرهٔ جریان، بهرهٔ قدرت، مقاومت ورودی و خروجی را مشخص نمایید. در شکل های زیر از ترسیم مدار تامین گرایش خودداری شده است.



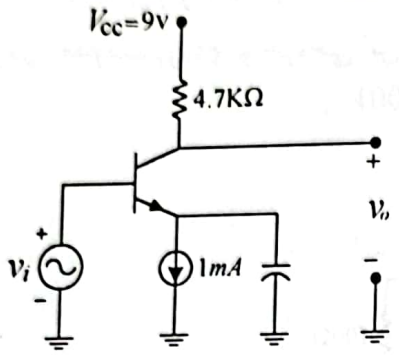
۸- مقاومت ورودی و بهرهٔ ولتاژ $A_{v_s} = v_o / v_s$ را در مدار کلکتور مشترک زیر حساب کنید، تغییر مقدار R_E چه اثری بر روی بهرهٔ ولتاژ این مدار دارد؟

$\beta = h_{fe} = 100$, $h_{re} \approx 0$, $h_{oe} \approx 0$



۹- مطلوبست تعیین بهرهٔ ولتاژ در مدار شکل رو به رو:

$\beta = h_{fe} = 200$, $h_{re} = 10^{-4}$, $h_{oe} = 10^{-5}\Omega^{-1}$



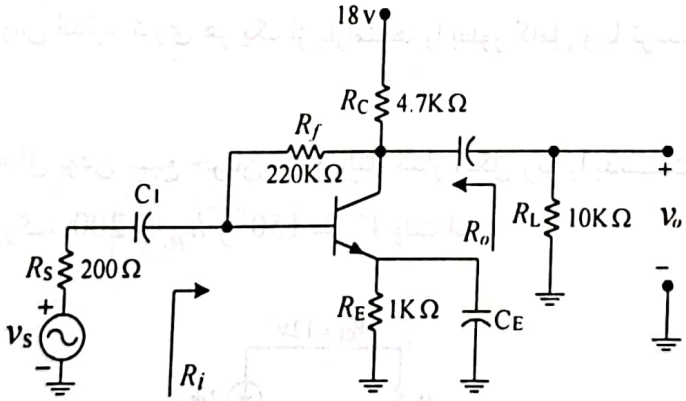
۱۰- با فرض اینکه $r_{ce} = h_{oe}^{-1}$ ، مساله ۹ را با استفاده از مدل هایبرید π تکرار کنید.

۱۱- مدار شکل زیر مفروض است:

الف) نقطهٔ کار مدار را بدست آورید. $\beta = 100$ و $V_{BE} = 0.6$ ولت .

ب) با توجه به اینکه $h_{fe} = 100$ و $h_{oe} = h_{re} = 0$ است، بهرهٔ ولتاژ ، A_{v_s} ، R_i و R_o را بدست آورید.

ج) وظیفهٔ مقاومت R_f در این مدار چیست؟



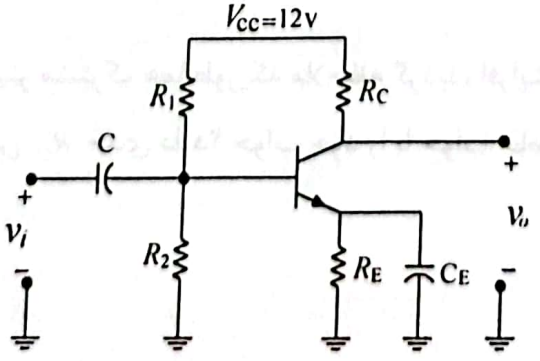
۱۲- در مدار امیتر مشترک شکل زیر مقدار مقاومت های R_1 ، R_2 ، R_C و R_E را طوری تعیین کنید که مدار ضمن برخورداری از پایداری خوب نسبت به تغییرات β ، مقاومت ورودی $R_i \geq 1K\Omega$ و بهرهٔ ولتاژ $|A_v| \geq 100$ داشته باشد.

$h_{fe} = \beta = 100$

$V_{BE} = 0.7V$

$C_E =$ خیلی بزرگ

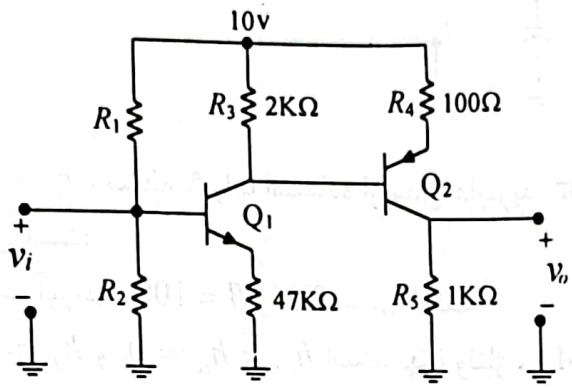
$h_{re} = h_{oe} = 0$



۱۳- مدار شکل زیر یک تقویت کنندهٔ دو طبقه با کوپلاژ DC را نشان می دهد. بهرهٔ ولتاژ، بهرهٔ جریان، مقاومت ورودی و خروجی این مدار را بدست آورید.

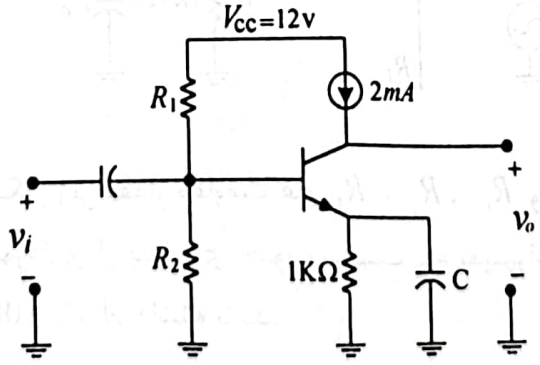
$I_{C_1} = 2mA$, $I_{C_2} = 5mA$, $V_{A_{NPN}} = 150V$, $V_{A_{PNP}} = 100V$,

$R_1 \| R_2 = 16K\Omega$, $h_{fe_1} = h_{fe_2} = 100$



۱۴- چگونه می توان پارامترهای هایبرید یک ترانزیستور در آرایش امیتر مشترک را در آزمایشگاه اندازه گیری کرد. روش اندازه گیری هر یک از پارامترها را بطور کامل و با ترسیم شکل مدار لازم شرح دهید.

۱۵- با توجه به ایده آل بودن منبع جریان، بهرهٔ ولتاژ مدار شکل زیر را بدست آورید. R_1، R_2 و C به اندازهٔ کافی بزرگ، $h_{fe} = 200$ و $V_A = 150$ ولت است.



۱۶- در یک تقویت کنندهٔ امیتر مشترک همانطوریکه ملاحظه گردید، افزایش R_C موجب افزایش بهرهٔ ولتاژ می گردد. آیا افزایش R_C حدی دارد؟ جواب خود را با جواب حاصل از مسأله ۱۵ مقایسه و با استدلال بحث کنید.

۶.۷ حل بعضی از مسائل فصل ششم

۱۱-

الف)

$$V_{CC} = (I_C + I_B)R_C + I_B R_f + 0.6 + I_E R_E$$

$$18 = I_E(4.7+1) + \frac{I_E}{101} \times (220 + 4.7) + 0.6$$

$$I_E = 2.2mA$$

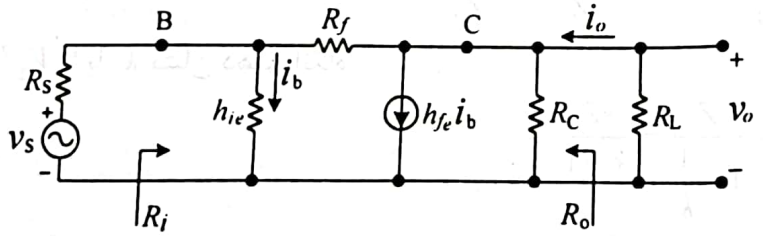
$$V_{CE} = 18 - 2.2(4.7+1) = 5.46V$$

ب) اگر از مدار هایبرید استفاده کنیم، لازم است ابتدا h_{ie} را بدست آوریم.

$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{26mV}{2.2mA} = 11.8\Omega$$

$$h_{ie} \approx (1+h_{fe})r_e \approx 101 \times 11.8 = 1194\Omega$$

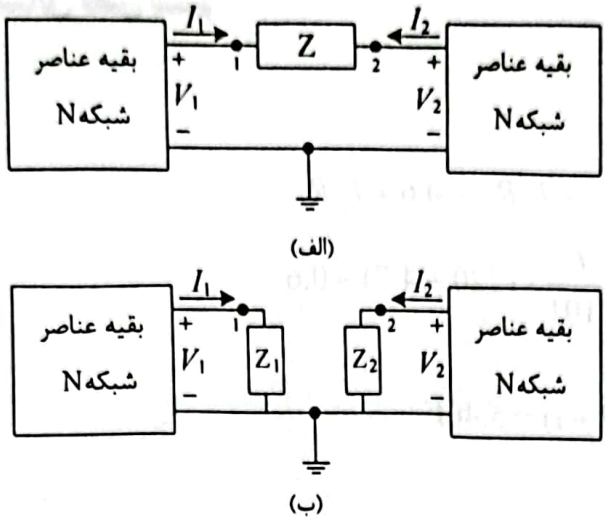
برای محاسبهٔ پارامترهای خواسته شده، ابتدا مدار معادل را ترسیم می کنیم.



برای ساده کردن مدار از قضیه میلر[۱]، که در اینجا جهت آشنایی اشاره خواهد شد، استفاده می کنیم.

با استفاده از قضیهٔ میلر می توان عناصر غیر فعال (مقاومت، خازن یا سلف) شناور بین دو نقطهٔ یک شبکه مثل شکل ۲۰-۶ الف را تحت شرایطی به شکل ۲۰-۶ ب تبدیل نمود.

۱-Miller's theorm



شکل ۲۰-۶ شبکه ای برای نشان دادن قضیهٔ میلر و معادل آن الف) شبکه اصلی ب) پس از اعمال قضیهٔ میلر.

در واقع با استفاده از قضیهٔ میلر می توان امپدانس Z را حذف نمود و امپدانس های Z_1 و Z_2 را طوری به گره های ۱ و۲ نسبت به یک مرجع متصل نمود که همچنان جریان I_1 و I_2 از شبکه ها کشیده شود.

به عبارت دیگر بر اساس قضیهٔ میلر این دو مدار معادل خواهند بود اگر:

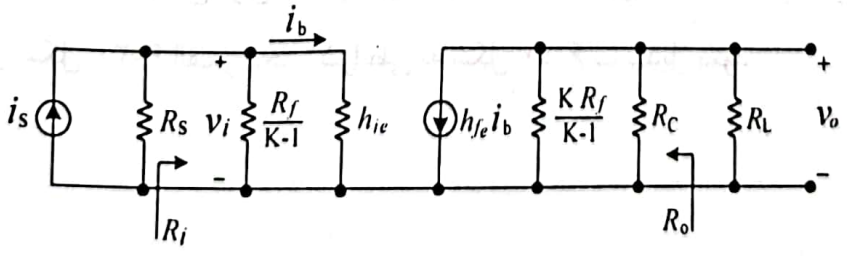
$$I_1 = \frac{V_1 - V_2}{Z} = \frac{V_1}{Z_1} \quad , \quad I_2 = \frac{V_2 - V_1}{Z} = \frac{V_2}{Z_2}$$

اگر نسبت V_2/V_1 را با k نشان دهیم آنگاه:

$$Z_1 = \frac{Z}{1-k} \quad , Z_2 = \frac{Z}{1-\frac{1}{k}} = \frac{kZ}{k-1}$$

خواهد شد. البته Z می تواند مقاومت، خازن، سلف یا ترکیبی از آنها باشد.

اکنون با توجه به نکات فوق می توانیم مقاومت R_f را که بین دو قسمت از مدار شناور است، به شکل زیر ساده نمائیم. ضمناً برای ساده شدن بیشتر، بجای v_S ، معادل نورتن آن را استفاده کردیم. بنابراین شکل زیر حاصل می شود.



$$i_s = \frac{v_s}{R_s}$$

$$v_o = -h_{fe} i_b R \,,\; R = \frac{kR_f}{k-1} \| R_C \| R_L$$

$$i_b = i_s \frac{R_s \left\| \frac{kR_f}{1-k} \right\| h_{ie}}{h_{ie}}$$

$$v_o = -h_{fe} \times R \times \frac{v_s}{R_s} \times \frac{R_s \left\| \frac{R_f}{1-k} \right\| h_{ie}}{h_{ie}}$$

$$\frac{v_o}{v_s} = \frac{-h_{fe} \times R}{R_s} \times \frac{R_s \left\| \frac{R_f}{1-k} \right\| h_{ie}}{h_{ie}}$$

از طرفی $k = v_o / v_i$ به سادگی محاسبه می شود:

$$k = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-h_{fe} i_b R}{i_b h_{ie}} = -h_{fe} \frac{R}{h_{ie}}$$

از آنجائیکه k در این مدار بهرهٔ امیتر مشترک و معمولاً خیلی بزرگتر از واحد است، $kR_f / k-1$ تقریباً برابر R_f خواهد بود. از آنجائیکه $R_f = 220$ کیلو اهم است بنابراین می توان در موازی R_C، R_L و R_f از R_f صرفنظر نمود، در نتیجه:

$$R \approx R_C \| R_L = \frac{47}{14.7} = 3.2\, K\Omega$$

$$k = -100 \times \frac{3200}{1194} = -268$$

بنابراین فرض k بزرگتر از واحد به خوبی قابل قبول است.

$$\frac{R_f}{1-k} = \frac{220}{269} = 818\Omega$$

بنابراین:

$$\frac{R_f}{1-k} \| R_s \| h_{ie} = 141\Omega$$

$$A_{v_S} = \frac{v_o}{v_s} = -\frac{100 \times 3200}{200} \times \frac{141}{1194} = -189$$

$$R_i = \frac{R_f}{1-k} \| h_{ie} = 818 \| 1194 = 485\Omega$$

$$R_o = \frac{v_o}{i_o}\Big|_{i_s = 0}$$

با صفر شدن i_s ، دیگر نمی توانیم از قضیهٔ میلر استفاده کنیم، لذا برای محاسبهٔ مقاومت خروجی باید مستقیماً عمل کنیم و نمی توانیم از ساده سازی میلر کمک بگیریم لذا به مدار معادل اول برمی گردیم و با اندکی تقریب (با توجه به بزرگ بودن R_f و کوچک بودن موازی h_{ie} و R_s) جریان i_o را به شکل زیر بدست می آوریم:

$$i_o = \frac{v_o}{R_C} + h_{fe} i_b + \frac{v_o}{R_f + R_s \| h_{ie}}$$

$$i_b \approx \frac{\frac{v_o}{R_f}(R_s \| h_{ie})}{h_{ie}} = \frac{v_o R_s}{R_f (R_s + h_{ie})}$$

بنابراین:

$$i_o = \frac{v_o}{R_C} + \frac{v_o R_s h_{fe}}{R_f (R_s + h_{ie})} + \frac{v_o}{R_f + R_s \| h_{ie}}$$

$$\frac{1}{R_o} = \frac{i_o}{v_o} = g_o = \frac{1}{R_c} + \frac{R_S h_{fe}}{R_f (R_s + h_{ie})} + \frac{1}{R_f + R_s \| h_{ie}}$$

از آنجائیکه در این مثال R_f مقدار بزرگی انتخاب شده است، نقش چندانی بر روی R_o ندارد و تقریباً می توان فرض کرد که:

$$\frac{1}{R_o} = \frac{1}{4.7} + \frac{100 \times 200}{220(200+1194)} \quad , \quad R_o \approx 4.7K\Omega$$

R_f نقش زیادی در مدار دارد. از نظر DC ، باعث پایداری گرایش ترانزیستور می شود، زیرا هرگونه تغییرات ناخواسته جریان کلکتور (بعنوان مثال افزایش I_C با دما) موجب تغییر ولتاژ کلکتور و در نتیجه تغییر جریان R_f می گردد که خود باعث تغییر I_C در جهت اصلاح خواهد شد. اگر جریان کلکتور با دما زیاد شود، V_C کم می شود که موجب کاهش جریان بیس و در نتیجه کاهش جریان کلکتور می گردد. بنابراین مقاومت R_f نوعی فیدبک منفی در مدار ایجاد می کند.

از نظر ac نیز همچنان نقش فیدبک منفی را بازی می کند و با تغییرات جریان کلکتور مخالفت می نماید. گرچه اصول و نقش فیدبک خارج از مطالب این کتاب است، ولی اثر مقاومت R_f بر روی بهرهٔ ولتاژ، مقاومت ورودی و خروجی کاملاً مشهود است. طراح با بکارگیری چنین مقاومتی می تواند هر یک از این پارامترها را کنترل نماید.

۱۲- برای حفظ پایداری نسبت به β لازم است:

$$R_1 \| R_2 << \beta R_E$$

باشد. با توجه به اینکه مقاومت ورودی این مدار تقریباً همان h_{ie} است، بنابراین اگر:

$$R_i = h_{ie} \geq 1\,K\Omega$$

باشد، با انتخاب یک مقدار برای R_i می توانیم جریان مدار را بدست آوریم.

$$h_{ie} \approx 1\,K\Omega = (h_{fe_1} + 1)r_e \Rightarrow r_e = 10\Omega$$

$$r_e = \frac{V_T}{I_E} \Rightarrow I_E = 2.6\,mA$$

و $I_B = 0.026$ میلی آمپر است.اگر $R_E = 1\,K\Omega$ انتخاب شود، در آن صورت باید $R_1 \| R_2 << 100K\Omega$ باشد.

$$V_B = 2.6 + 0.7 = 3.3V$$

$$R_1 = \frac{12 - 3.3}{11I_B} = \frac{8.7}{11 \times 0.026} = 30.4\,K\Omega$$

$$R_2 = \frac{3.3}{10I_B} = \frac{3.3}{0.26} = 12.7\,K\Omega$$

که $R_1 \| R_2$ باندازهٔ کافی از 100 کیلو اهم کوچکتر است.

R_c را نیز می توانیم طوری انتخاب کنیم که $V_{CEQ} = 6$ ولت گردد. بنابراین:

$$(R_C + R_E)I_{CQ} = 6V \ , \ R_C = 1.3\,K\Omega$$

بهرهٔ ولتاژ در این حالت عبارت است از:

$$|A_v| \cong \frac{R_C}{r_e} = \frac{1300}{10} = 130$$

که بیشتر از 100 می باشد.

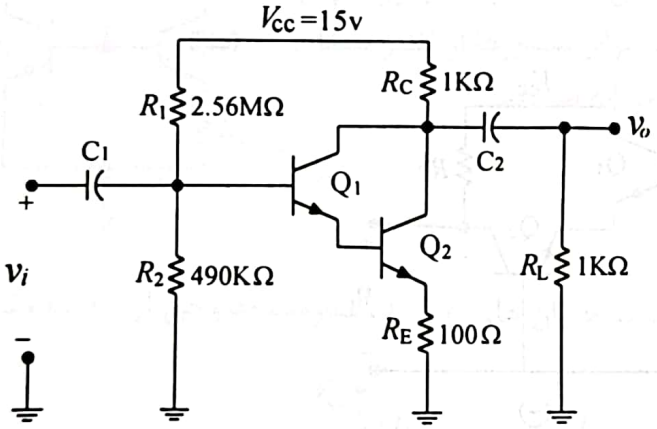
۱۶- بهرهٔ ولتاژ در یک تقویت کنندهٔ امیتر مشترک با تقریب نسبتاً خوب می تواند به شکل $A_v = -R_C/r_e$ تعریف شود. اگر V_{CC} ثابت بماند، افزایش R_C موجب کاهش I_C و در نتیجه افزایش r_e می گردد که در واقع بهرهٔ ولتاژ تغییرات چندانی نمی کند. اما اگر جریان نقطهٔ کار ثابت نگه داشته شود، مسلماً افزایش R_C موجب افزایش بهرهٔ ولتاژ می گردد. از آنجائیکه ترانزیستور یک منبع جریان ایده آل نیست، بلکه دارای مقاومت خروجی به مقدار $(1/h_{oe})r_{ce}$ می باشد، بهره با افزایش R_C تا آنجا افزایش می یابد که $R_C < r_{ce}$ باشد.

۷.۷ مسائل فصل هفتم

۱- به نظر شما ترانزیستورهای PNP و NPN چه کاربردهایی دارند؟

۲- می خواهیم منبع سیگنالی با مقاومت داخلی 100 کیلو اهم را جهت تقویت به یک تقویت کنندهٔ امیتر مشترک با مقاومت ورودی 1 کیلو اهم متصل کنیم. برای این کاربرد، مدار بافری طراحی کنید که این ارتباط را با کمترین تلفات ولتاژ انجام دهد.

۳- شکل زیر یک تقویت کنندهٔ امیتر مشترک را نشان می دهد که به جای یک ترانزیستور، از ترکیب دارلینگتون استفاده شده است. بهرهٔ ولتاژ، بهرهٔ جریان، مقاومت ورودی و خروجی این مدار را بدست آورده و آن را با یک امیتر مشترک معمولی مقایسه کنید.



$V_{BE} = 0.7V$

$h_{fe_1} = \beta_1 = 150$

$h_{fe_2} = \beta_2 = 100$

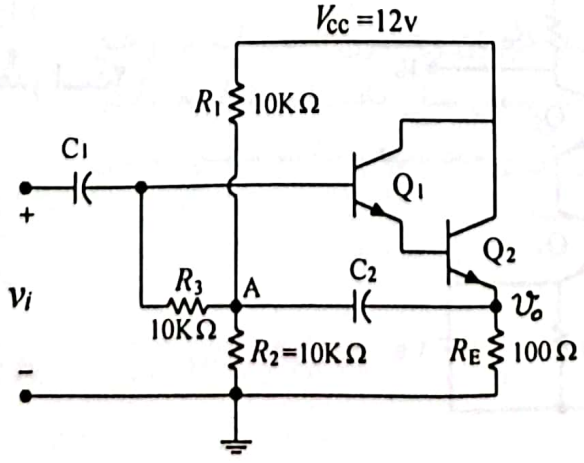
فرض کنید در هر دو ترانزیستور $h_{re}=0, h_{oe}=0$.

۴- مقدار مقاومت ورودی در مدار شکل زیر را بدست آورید.

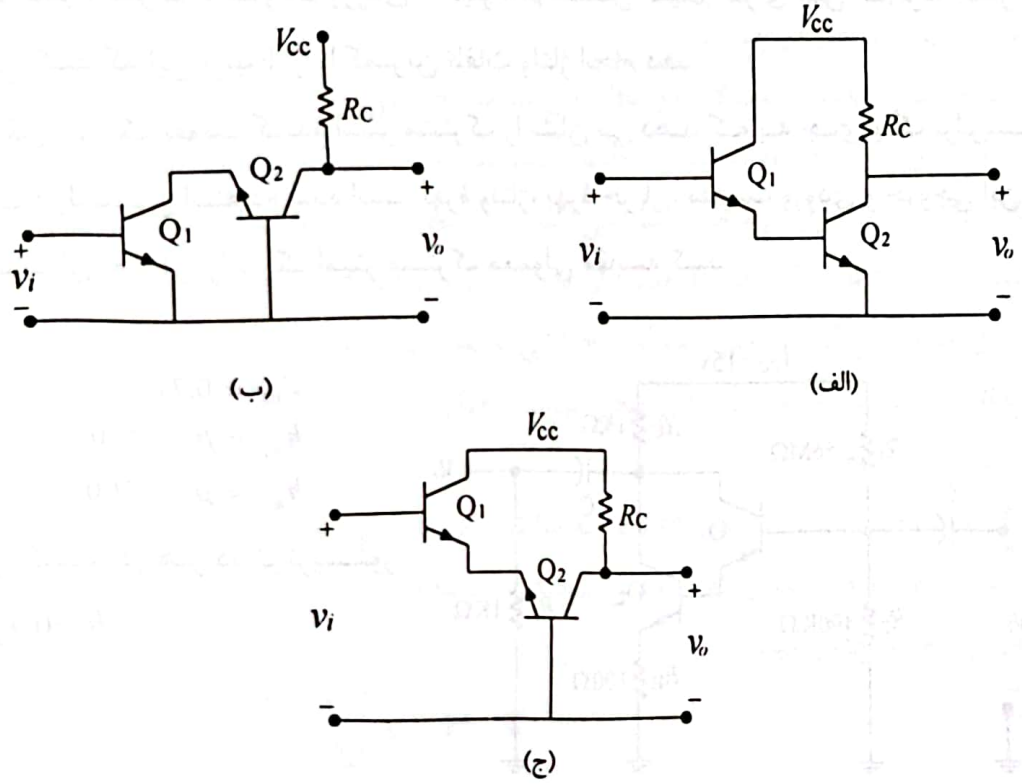
$\beta_1 = \beta_2 = h_{fe_1} = h_{fe_2} = 100$

$V_{BE} = 0.7V$

C_1 و C_2 به اندازهٔ کافی بزرگ هستند.



۵- همانطوریکه از بهم پیوستن دو ترانزیستور، ترکیب دارلینگتون حاصل می شود، از ترکیب ترانزیستور به شکل های زیر ترکیب های مختلفی حاصل می شود که هر یک می تواند کاربرد خاصی داشته باشد. نوع هر یک از آرایش های زیر را مشخص و در صورت امکان ویژگی های هر یک را بیان کنید.

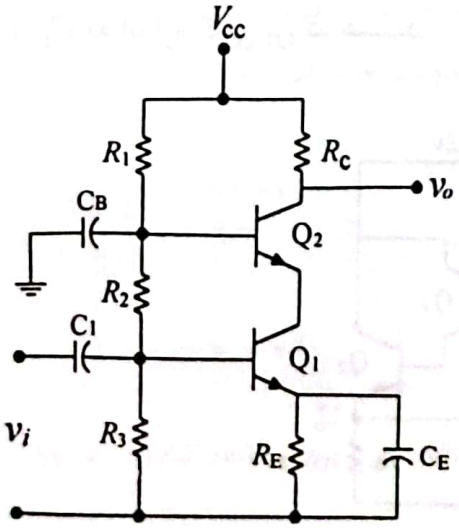


در این شکل ها از ترسیم مدارهای تأمین گرایش خودداری شده است.

۶- آیا می توانید ترکیب دیگری ارائه دهید؟

۷- مطلوبست ترسیم مدار تامین گرایش برای هر یک از ترکیب های مسأله ۵ .

۸- ترکیب امیتر مشترک و بیس مشترک که به کسکد موسوم است، با در نظر گرفتن مدار تأمین گرایش می تواند به شکل زیر ترسیم گردد.



الف- بهترین نقطهٔ کار ترانزیستورهای Q_1 و Q_2 از نظر V_{CE} چقدر است؟

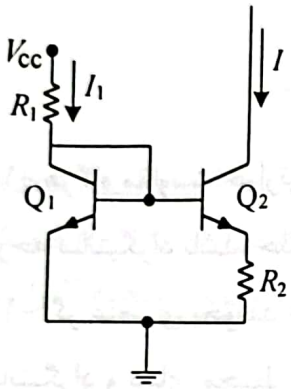
ب- بهرهٔ ولتاژ این مدار چقدر است؟

۹- می خواهیم یک تقویت کننده با بهرهٔ $A_v = 1000$ داشته باشیم. برای دستیابی به چنین بهره ای، از چند تقویت کنندهٔ امیتر مشترک استفاده خواهید کرد؟ مدار را بطور کامل ترسیم و مقدار تمام عناصر را تعیین کنید. برای این طراحی می توانید از ترانزیستور 2N2222 استفاده کنید.

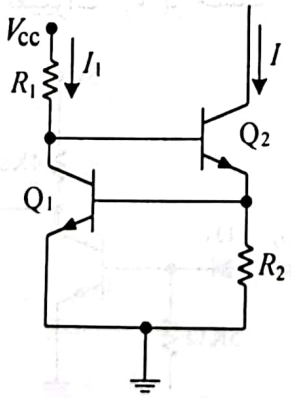
۱۰- مدار طراحی شدهٔ خود در مسألهٔ ۹ را با برنامهٔ کامپیوتری پی اسپایس مورد تجزیه و تحلیل قرار دهید. ترانزیستور انتخابی از کتابخانهٔ اسپایس می تواند 2N2222 باشد.

۱۱- اگر بخواهیم مساله ۹ را با کوپلاژ DC طراحی کنیم، به چه عناصری نیاز داریم. نوع ترانزیستورها و مقدار تمام عناصر را تعیین و نتیجه کار خود را با پی اسپایس مورد ارزیابی قرار دهید.

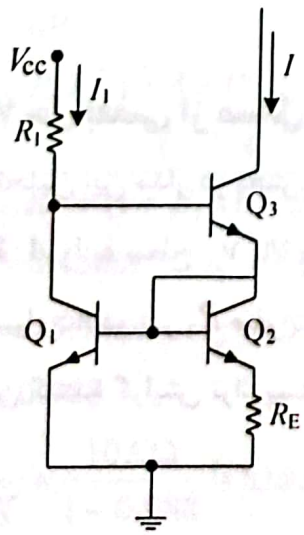
۱۲- شکل رو به رو مدار یک منبع جریان را نشان می دهد. مطلوبست تعیین نسبت جریان I/I_1 و مقاومت خروجی (داخلی) این منبع. اگر $V_{CC} = 10$ ولت، $I_1 = 10$ میلی آمپر و I ده میکرو آمپر باشد، مقدار مقاومت ها را تعیین کنید. ترانزیستورها از نظر سطح پیوند امیتر- بیس و میزان ناخالصی ها مشابه هستند.



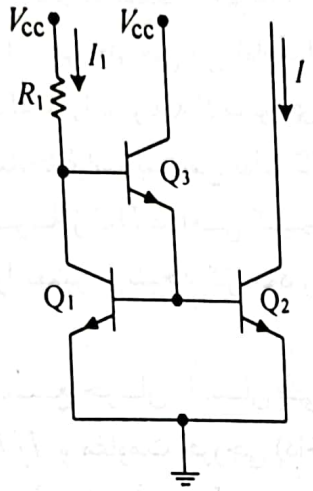
۱۳- در مدار شکل زیر ضمن تعیین نسبت جریان های I و I_1، مقاومت خروجی آن را با مقاومت خروجی مساله ۱۲ مقایسه کنید.



۱۴- مدار شکل زیر منبع جریان ویلسون است که در واقع مقاومت خروجی بزرگی دارد. ضمن نشان دادن نسبت I به I_1 در این مدار، مقاومت خروجی آن را محاسبه و با دو منبع جریان مسائل ۱۲ و ۱۳ مقایسه کنید.



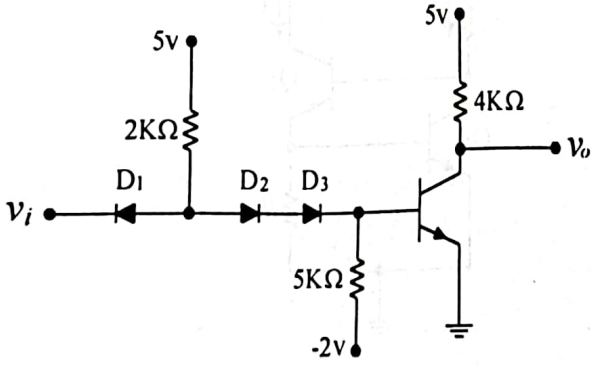
۱۵- اگر ترانزیستورها در مدار شکل زیر مشابه باشند، نسبت I/I_1 را بدست آورید.



۱۶- هرگاه مقاومت حرارتی ترانزیستوری $\theta_{Ja} = 0.5^\circ C/W$ و دمای قابل تحمل پیوندها $T_J = 125$ درجه سانتیگراد باشد، حداکثر قدرت مجاز دیود در محیط الف) $25^\circ C$ و ب) $50^\circ C$ چقدر است؟

۱۷- اگر عنصری بخواهد 4 وات مصرف داشته باشد و بخواهیم دمای قابل تحمل پیوند 175 درجه سانتیگراد و دمای محیط $45^\circ C$ و $\theta_{JC} = 2^\circ C/W$ باشد، چه گرماخوری برای این عنصر مناسب است؟

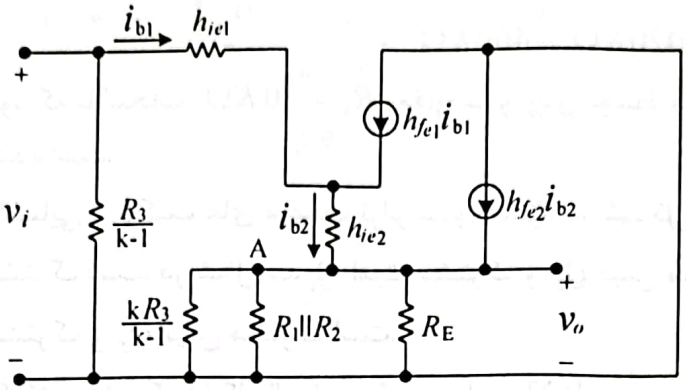
۱۸- مطلوبست ترسیم منحنی تغییرات v_o بر حسب v_i در مدار شکل زیر.



۷.۸ حل بعضی از مسائل فصل هفتم

۴- تحلیل این مدار در بخش ۷.۴ با توجه به نقش خازن C_2 که ولتاژ گره مشترک R_3 و C_2 ، نقطهٔ A را به سطح v_i بالا می آورد توضیح داده شده است. با بالا آمدن ولتاژ این گره، اختلاف پتانسیل ac دو سر R_3 صفر شده، بنابراین عبور جریان ac از مقاومتهای R_3 و R_1 ، R_2 (مقاومتهای تأمین کنندهٔ گرایش ترانزیستورها) تقریباً صفر می شود.

اما در اینجا قصد داریم با بکارگیری قضیه میلـر و ترسـیم مـدار معـادل، مقـدار مقـاومت ورودی را محاسبه کنیم، مدار معادل به شکل زیر ترسیم می شود.



با توجه به بزرگ بودن ظرفیت C_2 ، $v_o = v_A$ بوده و با توجه به اینکـه $v_o = v_i$ اسـت، انتظـار داریم K نزدیک واحد باشد. با این حساب، موازی مقاومتهای R_E ، R_1 ، R_2 و $KR_3/(K-1)$ یـک مقاومت مثبت و تقریبا مساوی R_E نتیجه خواهد شد. بنـابراین مـی تـوان v_o و در نتیجـه K را بـه شکل زیر محاسبه نمود.

$$v_o = (1+h_{fe_2})(1+h_{fe_1})R_E i_{b_1}$$

$$v_i = \left[h_{ie_1} + (1+h_{fe_1})h_{ie_2} + (1+h_{fe_1})(1+h_{fe_2})R_E\right] i_{b_1}$$

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{(1+h_{fe_1})(1+h_{fe_2})R_E}{h_{ie_1} + (1+h_{fe_1})h_{ie_2} + (1+h_{fe_1})(1+h_{fe_2})R_E}$$

اگر R_E به اندازهٔ کافی از r_{e_2} بزرگتر باشد می توان از دو جملهٔ اول در مخرج کسـر صرفنظـر نمـود که در آن صورت v_o/v_i واحد می شود، ولی در عمل اینطور نیست و همانطوریکه مشاهده شد، K نزدیک واحد است و در نتیجه $R_3/(1-K)$ بسیار بزرگ خواهد شد. با توجه به مقادیر عناصر داده شده در مدار می توانیم مقدار عددی K و دیگر پارامترها را محاسبه کنیم.

اگر جریان DC مقاومت R_3 را که همان جریان بیس است ناچیز در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$V_A = 6V$$

$$V_A = R_3 I_B + 1.4 + (1+\beta_1)(1+\beta_2)I_B R_E$$

$$I_B = \frac{6-1.4}{R_3 + (1+\beta_1)(1+\beta_2)R_E} = \frac{4.6}{10 + 101\times 101\times 0.1} = 4.46\mu A$$

$$I_{E_1} = 0.45mA \qquad r_{e_1} = 58\ \Omega$$

$$I_{E_2} = 45.5mA \qquad r_{e_2} = 0.57\ \Omega$$

$$A_v = 0.988$$

$$\frac{R_3}{1-K} = \frac{10K\Omega}{1-0.988} = 834K\Omega$$

بنابراین:

$$R_i = \frac{R_3}{1-K} \| (1+h_{fe_1})(1+h_{fe_2})R_E$$

$$R_i = 834K\Omega \| 1020K\Omega = 460K\Omega$$

بنابراین ملاحظه می شود که با انتخاب $R_3 = 10K\Omega$ ، مقاومت ورودی توسط مقاومت‌های تأمین کنندهٔ گرایش محدود شده است.

۵- هدف از این مسأله آشنایی با ترکیب های مختلف ترانزیستور است، در شکل الف، Q_1 کلکتور مشترک و Q_2 امیتر مشترک است. در شکل ب، Q_1 امیتر مشترک و Q_2 بیس مشترک است. در شکل ج ، Q_1 کلکتور مشترک و Q_2 بیس مشترک است.

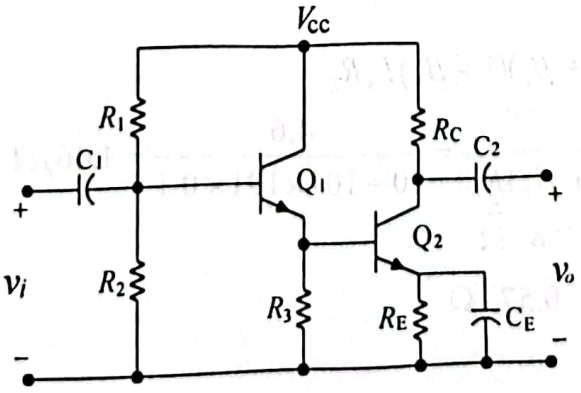
ترکیب امیتر مشترک-کلکتور مشترک (شکل الف)، بهرهٔ جریان بالا دارد ولی بهرهٔ ولتاژ آن در سطح یک امیتر مشترک معمولی است. حسن این مدار علاوه بر بهرهٔ جریان بالا، مقاومت ورودی زیاد کلکتور مشترک است که در ورودی قرار داده شده است. زیرا این مدار از نظر بهرهٔ ولتاژ همان مدار امیتر مشترک است که مقاومت ورودی آن را با قرار دادن کلکتور مشترک افزایش دادیم.

ترکیب شکل ب که به کسکد نیز معروف است، از نظر بهرهٔ ولتاژ و بهرهٔ جریان در سطح یک امیتر مشترک ساده است. مقاومت خروجی و ورودی آن نیز مشابه یک امیتر مشترک است. ویژگی مهم این مدار در فرکانس های بالا است که از بحث این مجموعه خارج است.

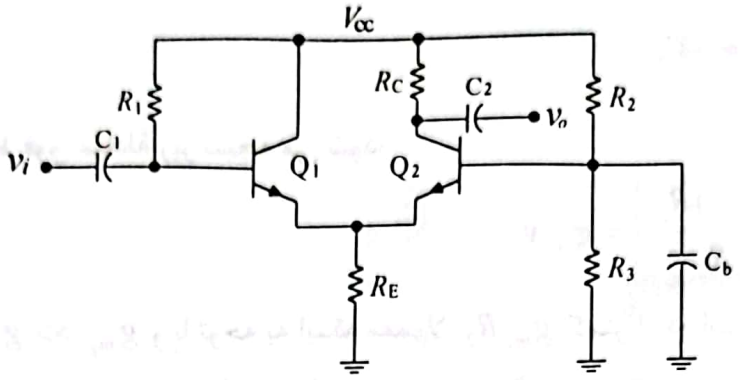
ترکیب شکل ج نیز به امیتر کوپل شده معروف است که بهرهٔ ولتاژ آن نصف بهرهٔ ولتاژ یک امیتر مشترک ساده ولی با فاز مثبت است. بهرهٔ جریان در حد امیتر مشترک ولی با توجه به وجود کلکتور مشترک در ورودی، مقاومت ورودی آن زیاد است.

ویژگی اصلی تمام ترکیب های فوق از نظر امکان کار در فرکانس های بالا است که متاسفانه خارج از بحث این کتاب است و تنها ذهن شما را برای پیدا کردن علت آماده می کند.

۷- نحوهٔ تامین گرایش مدار کسکد (شکل ب) در مساله ۸ ترسیم شده است. نحوهٔ تامین گرایش هر یک از دو مدار دیگر می تواند به شکل زیر باشد.



(الف)



(ج)

-۱۲

$$V_{BE_1} = V_{BE_2} + I_{C_2} R_2 \, , I_{C_2} \approx I_{E_2} = I$$

$$V_T \ln \frac{I_1}{I_{S_1}} = V_T \ln \frac{I_{C_2}}{I_{S_2}} + I_{C_2} R_2 \, , I_{C_1} \approx I_1$$

اگر فرض کنیم دو ترانزیستور از نظر میزان و نوع ناخالصی ها و از نظر سطح پیوند امیتر- بیس مشابه باشند، $I_{S_1} = I_{S_2}$ خواهد بود. در نتیجه:

$$V_T \ln \frac{I_1}{I_{C_2}} = I_{C_2} R_2$$

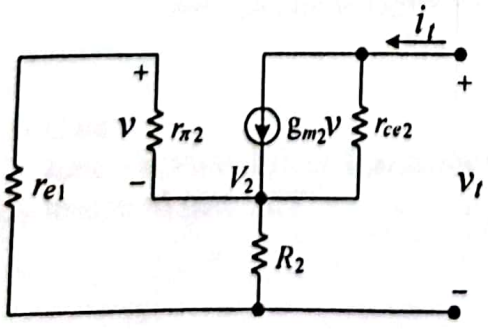
اگر طبق فرض مسأله $I_1 = 1$ میلی آمپر و $I = 10$ میکروآمپر باشد:

$$R_2 = \frac{26mV \ln 100}{10\mu A} \cong 12K\Omega$$

$$R_1 = \frac{V_{CC} - V_{BE_1}}{I_1} = \frac{10V - 0.7}{1mA} = 9.3K\Omega$$

البته دقت کنید که برای محاسبهٔ R_1 نیازی نیست V_{BE_1} را با دقت زیاد بدست آوریم زیرا تأثیر چندانی بر روی مقدار مقاومت R_1 ندارد، لذا 0.7 ولت که نزدیک به واقعیت است انتخاب شده است.

برای محاسبهٔ مقاومت خروجی از مدار معادل هایبرید π ترانزیستور به شکل زیر استفاده می کنیم. در این شکل r_{e_1} نسبت به تمام مقاومت های موازی خود کوچکتر فرض شده است.



$$i_1 = g_{m_2} v + (v_1 - V_2) g_{ce_2} \, , g_{ce_2} = \frac{1}{r_{ce_2}}$$

$$V_2 = (g_{\pi_2} v + i_1) R_2$$

از طرفی:

$$v = -\frac{V_2 r_{\pi_2}}{r_{e_1} + r_{\pi_2}} \approx -V_2$$

با جایگزینی روابط فوق معادلهٔ زیر نتیجه می شود:

$$i_t \left[1 + \frac{(g_{m_2} + g_{ce_2}) R_2}{1 + g_{\pi_2} R_2} \right] = g_{ce_2} v_t$$

سپس با فرض $g_{m_2} >> g_{ce_2}$ و با توجه به اینکه معمولا $g_{m_2} R_2$ کمتر از ده است، $g_{\pi_2} R_2$ خیلی کوچکتر از واحد بوده و در نتیجه خواهیم داشت:

$$\frac{v_t}{i_t} = r_{ce_2} (1 + g_{m_2} R_2)$$

یعنی مقاومت خروجی این مدار $(1 + g_{m_2} R_2)$ برابر از مقاومت خروجی مدار شکل ۱۲-۷ بیشتر خواهد بود (البته اگر هر دو در یک جریان I_{C_2} کار کنند).

۸.۱۰ مسائل فصل هشتم

۱- چرا به ترانزیستورهای اثر میدانی، ترانزیستور تک قطبی گفته می شود؟

۲- جریان دهی یک JFET چگونه تابع چگالی ناخالصی کانال است؟

۳- هر قدر ولتاژ تنگش بیشتر باشد، جریان دهی JFET افزایش یا کاهش می یابد؟ شرح دهید.

۴- چرا اصولاً گیت JFET را با چگالی ناخالصی بیشتر از کانال می سازند؟

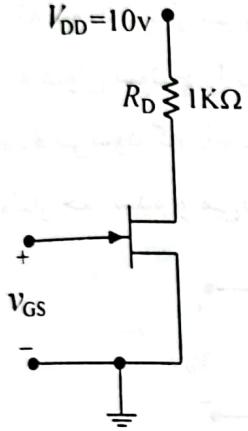
۵- تنگش را تعریف کنید.

۶- چه منطقه ای از منحنی مشخصهJFET برای تقویت کنندگی مناسب است؟ چرا؟

۷- میزان تقویت کنندگیJFET را با ترانزیستور دو قطبی مقایسه کنید. مزایا و برتری های هر یک را برشمارید.

۸- چند نوع JFET از نوع کانال N و P را از کتاب راهنمای قطعات پیدا کنید و با مشخص کردن جریان I_{DSS} و ولتاژ V_P ، آنها را در جدولی دسته بندی کنید.

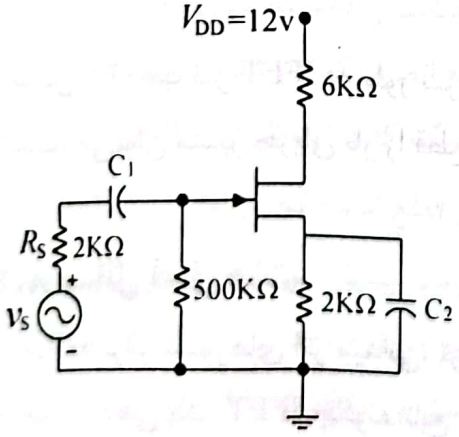
۹- مطلوبست تعیین جریان درین در مدار زیر هنگامی که $v_{GS} = 0, -1, -2, -3$ ولت باشد. $I_{DSS} = 10\,mA$ و $V_P = -3$ ولت است.



۱۰- منحنی مشخصه $i_D(v_{GS}, v_{DS})$ یک JFET که ولتاژ تنگش آن 1- ولت است را با مقیاس دلخواه ترسیم کنید. هر گونه فرضی در مورد پارامترهای مؤثر در ترسیم منحنی را منعکس نمائید.

۱۱- نقطهٔ کار ترانزیستور در مدار شکل زیر را بدست آورید. C_1 و C_2 به اندازهٔ کافی بزرگ هستند.

$V_P = -4V$, $I_{DSS} = 4m\,A$

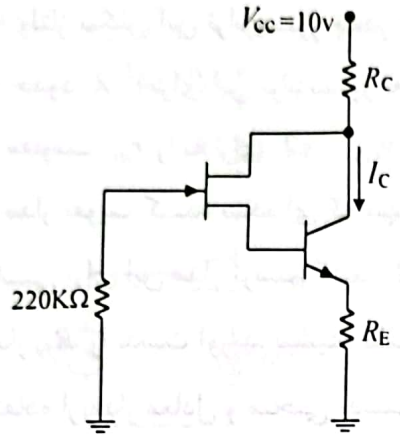


۱۲- بهرهٔ ولتاژ، جریان، مقاومت ورودی و خروجی مدار مسأله ۱۱ را بدست آورید.

۱۳- مقدار R_E در مدار شکل صفحه بعد را طوری تعیین کنید که $I_C = 4$ میلی آمپر گردد.

مشخصات ترانزیستورهای BJT و JFET عبارتند از:

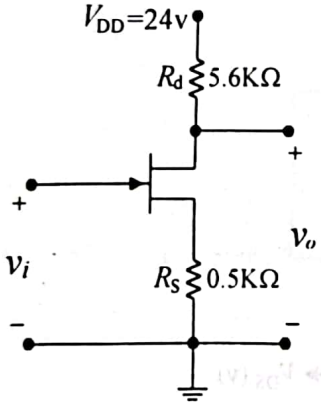
$\beta = 100$, $V_{BE} = 0.7V$, $I_{DSS} = 1\,mA$, $V_P = -2V$



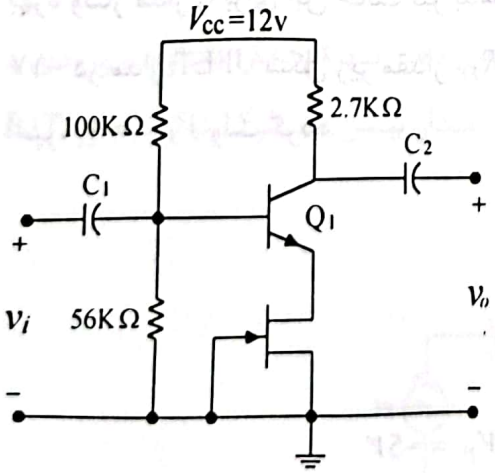
۱۴- پارامترهای JFET در مدار شکل رو به رو $I_{DSS} = 5m\,A$ ، $V_P = -4$ ولت است.

الف- جریان درین را به ازای $v_i = 0$ ولت بدست آورید.

ب- اگر $r_{ds} = 25$ کیلو اهم باشد، بهرهٔ ولتاژ مدار در نقطهٔ کار بدست آمده در مرحلهٔ اول چقدر است؟



۱۵- با توجه به مشخصات ترانزیستورها، نقطهٔ کار ترانزیستور BJT را بدست آورید.



$\beta = 150$ ، $I_{DSS} = 2\,mA$ ، $V_P = -2\,V$

۱۶- شکل صفحه بعد منحنی $i_D(v_{GS}, v_{DS})$ یک JFET کانال N را نشان می دهد.

الف- مقاومت کانال JFET در $v_{GS} = -1$ و به ازای v_{DS} های کوچک چقدر است؟

ب- مقاومت کانال در $v_{GS} = 0$ ولت حول مبدأ چقدر است؟

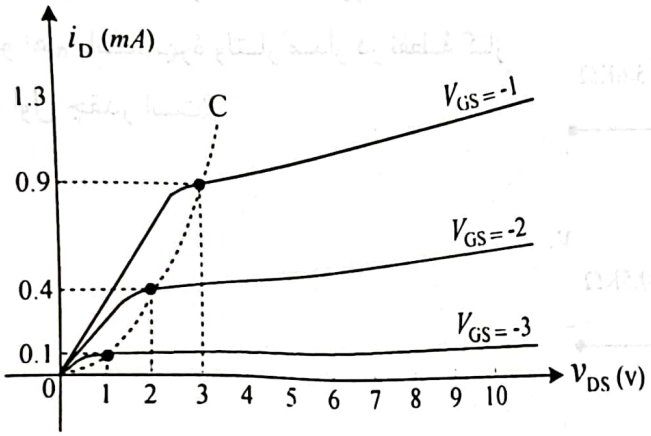
ج- ولتاژ تنگش این ترانزیستور چقدر است؟

د- حدود λ را برای این ترانزیستور تعیین کنید.

ه- مقاومت r_{ds} را به ازای $v_{GS} = -2$ و v_{DS}های پائین و بالا (قبل و بعد از تنگش) بدست آورید.

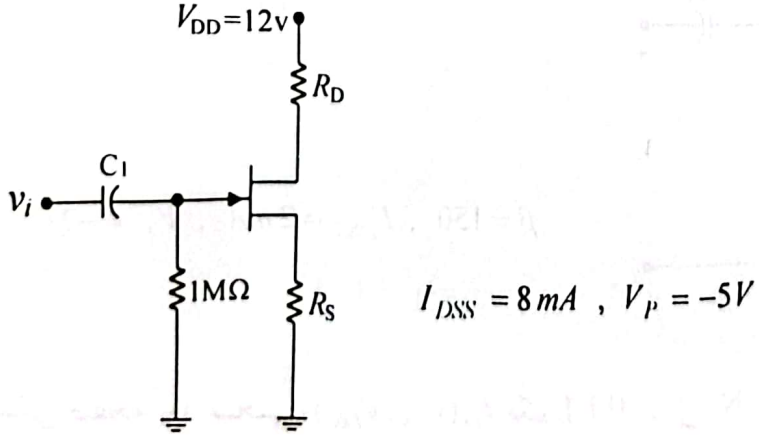
و- مدار تقویت کنندهٔ ساده ای که تنها شامل R_S و R_D است با این JFET رسم کنید. خط بار مناسبی برای این مدار ترسیم کنید، $V_{DD} = 18$ ولت در نظر بگیرید. اگر $R_S = 1$ کیلو اهم باشد، مقدار R_D را بدست آورید. بیشینهٔ دامنهٔ نوسان ولتاژ خروجی چقدر است؟ بهرهٔ ولتاژ مدار را با استفاده از مدار معادل و منحنی بدست آورید.

ز- اگر بار $R_L = 10K\Omega$ به خروجی مدار (با کوپلاژ خازنی) متصل گردد، خط بار ac را ترسیم و بهترین نقطهٔ کار مدار را تعیین کنید. بیشینهٔ نوسانات ولتاژ خروجی در این حالت چقدر است؟

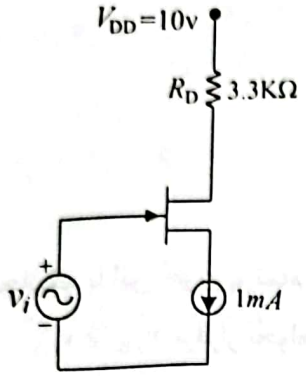


بهرهٔ ولتاژ مدار را برای این حالت نیز بدست آورید.

۱۷- در مدار JFET شکل زیر مقدار R_D و R_S را طوری تعیین کنید که به ازای $I_D = 2$ میلی آمپر، $V_{DS} = 4$ ولت گردد.

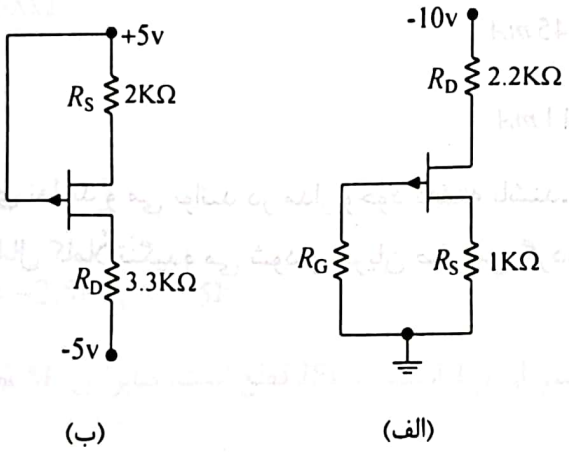


۱۸- آیا مدار زیر در منطقهٔ اشباع ترانزیستور کار می کند؟



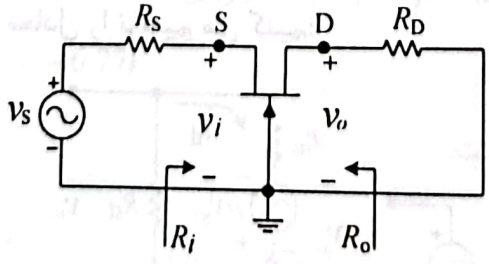
$$I_{DSS} = 8\,mA \;,\; V_P = -5V$$

۱۹- در مدار زیر از یک JFET کانال P استفاده شده است. اگر $V_P = 4\,V$ و $|I_{DSS}| = 5$ میلی آمپر باشد، نقطهٔ کار مدار را بدست آورید.



(ب) (الف)

۲۰- شکل زیر یک JFET در حالت گیت مشترک را نشان می دهد. بهرهٔ ولتاژ، مقاومت ورودی و مقاومت خروجی این آرایش را بدست آورده و نتایج را با مدار بیس مشترک ترانزیستور BJT مقایسه کنید. (تنها معادل ac مدار ترسیم شده است.)



۸.۱۱ حل بعضی از مسائل فصل هشتم

-۹

$$i_D = I_{DSS}(1-\frac{v_{GS}}{V_P})^2$$

$$i_D = 10mA(1-\frac{0}{V_P})^2 = 10mA$$

از آنجائیکه با این جریان، تمام ولتاژ تغذیه روی مقاومت R_D افت می کند، $v_{DS} = 0$ و شرط $v_{DS} \geq v_{GS} - V_P$ برقرار نخواهد بود. یعنی جریان درین را نمی توان از این رابطه بدست آورد. لذا باید از معادلهٔ اهمی یا تریودی استفاده کرد که معمولاً برای دروسی در این سطح ارائه نمی شود. اگر منحنی ترانزیستور معلوم باشد، می توان با استفاده از رسم خط بار DC و تعیین محل تقاطع آن با منحنی $v_{GS} = 0$ ، جریان درین را پیدا کرد.

اکنون $v_{GS} = -1$ ولت را بررسی می کنیم

$$I_D = 10(1-\frac{-1}{-3})^2 = 4.45\,mA$$

$$I_D = 10(1-\frac{-2}{-3})^2 = 1.11\,mA$$

که این دو جریان مسأله ای ندارند و می توانند در مدار وجود داشته باشند، اما به ازای حالت آخر که $v_{GS} = -3V$ است، کانال کاملاً تنگیده می شود و جریان صفر می گردد.

-۱۴

الف- با $v_i = 0$ ولت داریم:

$$V_{GS} = -I_D R_S$$

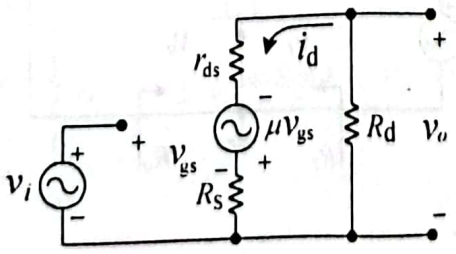
$$I_D = I_{DSS}(1-\frac{V_{GS}}{V_P})^2$$

$$-2V_{GS} = 5(1-\frac{V_{GS}}{-4})^2$$

$$V_{GS} = -1.2V\,, -13.2V$$

که $V_{GS} = -1.2$ ولت قابل قبول است. در نتیجه $I_D = 2.4\,mA$.

ب- برای محاسبهٔ بهره، مدار معادل را ترسیم می کنیم:



$$v_i = v_{gs} + i_d R_S$$

$$v_o = -i_d R_d = -\frac{\mu v_{gs} R_d}{r_{ds} + R_S + R_d}$$

$$i_d = \frac{\mu v_{gs}}{r_{ds} + R_S + R_d}$$

با حل این روابط بهرهٔ ولتاژ به شکل زیر محاسبه می شود:

$$A_v = \frac{-\mu R_d}{r_{ds} + R_d + (1+\mu)R_S} \quad , \quad \mu = g_m r_{ds}$$

g_m را می توان با توجه به جریان نقطهٔ کار بدست آورد.

$$g_m = \frac{-2}{V_P}\sqrt{I_d I_{dss}} = \frac{1}{2}\sqrt{2.4\,mA \times 5} = 1.73\,m\Omega^{-1}$$

$$\mu = g_m r_{ds} = 43.3$$

$$A_v = \frac{-43.3 \times 5.6}{25 + 5.6 + 44.3 \times 0.5K\Omega} = 4.6$$

-۱۷

$$I_D = I_{DSS}(1 - \frac{V_{GS}}{V_P})^2$$

$$2 = 8(1 + \frac{V_{GS}}{5})^2 \, , V_{GS} = -2.5V \;\; , \;\; -7.5V$$

با $V_{GS} = -7.5V$ که کمتر از V_P است، JFET قطع است، بنابراین $V_{GS} = -2.5V$ جواب قابل قبول است.

$$V_{GS} = -I_D R_S \;\; , \;\; R_S = \frac{2.5}{2} = 1.25\,K\Omega$$

$$V_{DD} = I_D R_S + V_{DS} + I_D R_D \;\; , \;\; R_D = \frac{12 - 4 - 2.5}{2\,mA} = \frac{5.5}{2} = 2.75\,K\Omega$$

۱۸- برای اینکه ترانزیستور در منطقهٔ اشباع باشد باید $v_{DS} > v_{GS} - V_T$ گردد، بنابراین ابتدا باید V_{GS} و V_{DS} را بدست آوریم. با توجه به اینکه جریان $I_D = 1mA$ است:

$$1 = 8(1 + \frac{V_{GS}}{5})^2 \, , V_{GS} = -3.2V \;\; , \;\; -6.77V$$

که $V_{GS} = -3.2V$ درست است.

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D - V_{SG}$$

$$V_{DS} = 10 - 3.3 - 3.2 = 3.5V$$

$$V_{DS} \geq V_{GS} - V_P \;\; \Rightarrow \;\; 3.5 > -3.2 + 5$$

بنابراین در منطقهٔ اشباع است.

۱۹-

الف-

$$V_{GS} = +I_D$$

$$I_D = I_{DSS}(1 - \frac{V_{GS}}{V_P})^2$$

$$V_{GS} = 5(1 - \frac{V_{GS}}{4})^2$$

$$V_{GS} = 1.68V \ , \ 9.5V$$

چون 9.5 ولت بیشتر از V_P است غیر قابل قبول می باشد. بنابراین:

$$V_{GS} = 1.68V, I_D = 1.68mA$$

$$V_{DS} = -10 + (2.2 + 1) \times 1.68 = -4.62V$$

$$|V_{DS}| > |V_{GS} - V_P| \Rightarrow \ 4.62 > |1.68 - 4|$$

بنابراین معادلات صادق هستند.

ب-

$$I_D R_S = V_{GS}$$

$$I_D = I_{DSS}(1 - \frac{V_{GS}}{V_P})^2$$

$$\frac{V_{GS}}{R_S} = I_{DSS}(1 - \frac{V_{GS}}{V_P})^2$$

$$\frac{V_{GS}}{2} = 5(1 - \frac{V_{GS}}{4})^2$$

$$V_{GS} = 2.1V, 7.45V$$

که $V_{GS} = 2.1V$ قابل قبول است. در نتیجه:

$$I_D = 1.05\,mA$$

$$V_{DS} = -10 + (R_S + R_D) I_D = -4.43$$

۹.۱۳ مسائل فصل نهم

۱- چگونه می توان با یک دستگاه اهم متر، نوع یک ترانزیستور نامعلوم را از اینکه JFET ، BJT یا MOS باشد از هم تشخیص داد؟ روش کار خود را با دلیل بنویسید.

۲- چگونه تخلیه ای یا افزایشی بودن یک ترانزیستور MOS را با اهم متر مشخص می کنید؟ اصول کار خود را شرح دهید.

۳- یک ترانزیستور NMOS با $V_T = 1$ ، $\beta = 1\,mA/V^2$ ولت و $\lambda = 0$ موجود است. منحنی i_D بر حسب v_{DS} آن را به ازای $V_{GS} = 3$ ولت ترسیم کنید. اگر V_{GS} را دو برابر کنیم، جریان چه مقدار تغییر خواهد کرد؟ با ترسیم منحنی نشان دهید.

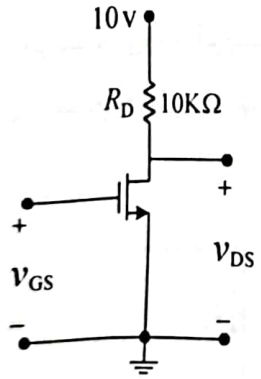
۴- یک ترانزیستور NMOS تخلیه ای با $V_T = -2$ ، $\beta = 0.5\,mA/V^2$ ولت و $\lambda = 0$ موجود است. اگر سورس و گیت آن را به زمین (پتانسیل صفر) متصل کنیم، به ازای چه مقادیری از v_{DS} ترانزیستور در منطقهٔ اشباع خواهد بود؟ جریان ترانزیستور در منطقهٔ اشباع چقدر است؟

۵- اگر نسبت ابعاد یک ترانزیستور PMOS هشت برابر ترانزیستور دیگری از همان نوع باشد، تحت ولتاژهای اعمال شده مشابه، نسبت جریان ترانزیستورها چگونه خواهد بود، با نوشتن رابطه نشان دهید.

۶- چگونه می توان ترانزیستوری با جریان دهی بیشتر ساخت؟

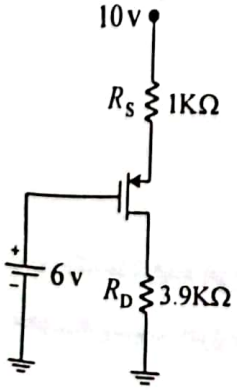
۷- جریان و ولتاژ نقطهٔ کار مدار شکل رو به رو را به ازای $v_{GS} = 1,2,3,4$ ولت بدست آورید.

$V_T = 1, \beta = 0.2\,mA/V^2, \lambda = 0$ ولت است.

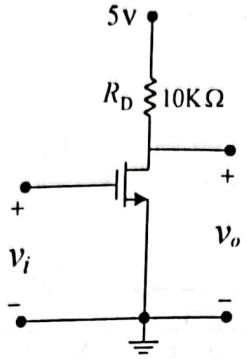


۸- اگر گیت و درین یک ترانزیستور PMOS افزایشی را بهم متصل کنیم، پس از تأمین گرایش های مناسب، ترانزیستور در چه منطقه ای از منحنی مشخصه خود کار خواهد کرد؟

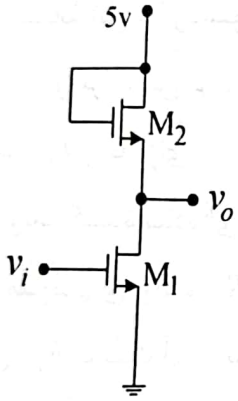
۹- در مدار شکل زیر نقطهٔ کار ترانزیستور را بدست آورید. $V_T = -1, \beta = 1\,mA/V^2, \lambda = 0$ ولت است. اگر فرض کنیم که این ترانزیستور با تکنولوژیی ساخته شده است که $K_P' = 10\ \mu A/V^2$ باشد، نسبت W/L چقدر باید باشد تا بتواند چنین جریانی را به خوبی از خود عبور دهد؟



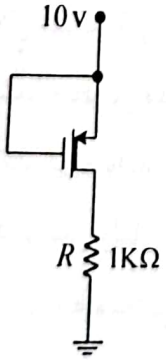
۱۰- منحنی تغییرات v_o برحسب v_i را برای مدار شکل زیر به دقت ترسیم کنید. $\lambda = 0$ ، $\beta = 0.1 mA/V^2$ ، $V_T = 2$ ولت است.



۱۱- منحنی تغییرات v_o بر حسب v_i را برای مدار شکل زیر ترسیم کنید. M_1 با $\beta = 1 mA/V^2$ ، $V_T = +1$ ولت و M_2 با $\beta = 0.1 mA/V^2$ ، $V_T = +1$ ولت است. λ برای هر دو ترانزیستور را صفر در نظر بگیرید.



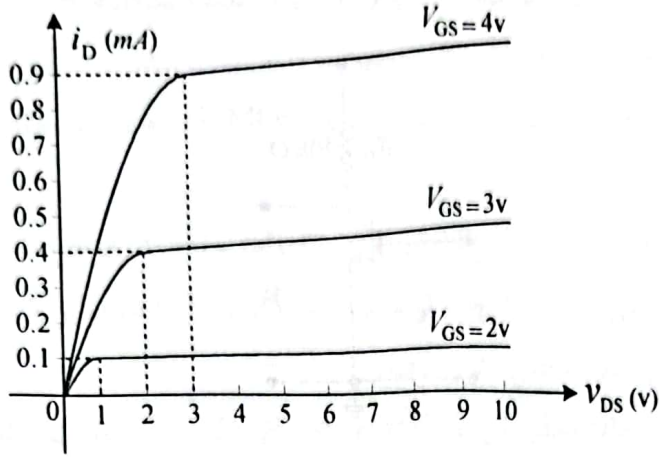
۱۲- ترانزیستور مدار شکل زیر در چه منطقه ای از منحنی مشخصه خود کار می کند؟ ترانزیستور از نوع تخلیه ای با $\lambda = 0$ ، $\beta = 1 mA/V^2$ ، $V_T = 2$ ولت است. مقاومت R چه مقدار تغییر کند تا منطقهٔ کار ترانزیستور در حالت اول عوض شود؟



۱۳- منحنی مشخصهٔ $i_D(v_{GS}, v_{DS})$ یک MOS افزایشی با ولتاژ $V_T = 1$ ولت را با دقت و با مقیاس دلخواه ترسیم کنید. هرگونه فرضی در مورد پارامترهای مؤثر در ترسیم منحنی را منعکس نمائید.

۱۴- میزان تقویت کنندگی ترانزیستور MOS را با ترانزیستور دو قطبی مقایسه و مزایا و معایب ترانزیستور MOS را نسبت به BJT بیان کنید.

۱۵- شکل زیر منحنی $i_D(v_{GS}, v_{DS})$ یک ترانزیستور NMOS را نشان می دهد.



الف- مقاومت کانال این ترانزیستور در $v_{GS} = 3$ ولت و به ازای v_{DS} های کوچک چقدر است؟

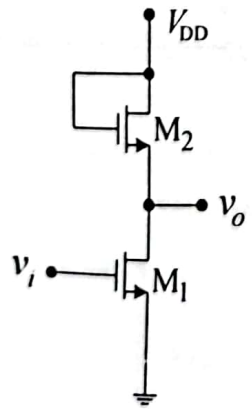
ب- ولتاژ آستانهٔ این ترانزیستور چقدر است؟

ج- حدود λ را برای این ترانزیستور تعیین کنید.

د- مقاومت r_{ds} را به ازای $v_{GS} = 3$ ولت تعیین کنید.

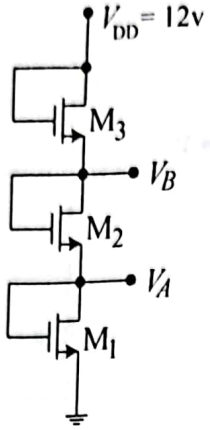
ه- مدار تقویت کنندهٔ ساده ای را که تنها شامل R_D است با این ترانزستور رسم کنید. برای تأمین گرایش از مقاومتهای R_1 و R_2 استفاده کنید. خط بار مناسبی رسم کنید که از روی آن بتوان یک مقدار برای R_D بدست آورد. با توجه به مقدار V_{GS_Q} ، مقدار R_1 و R_2 را نیز به دلخواه تعیین کنید. V_{DD} را 5 ولت در نظر بگیرید. بیشینهٔ دامنهٔ نوسان ولتاژ خروجی چقدر است؟

۱۶- در تقویت کنندهٔ شکل زیر از ترانزیستور M_2 به عنوان بار ترانزیستور M_1 استفاده شده است. مدار تأمین گرایش را ترسیم نکردیم. اگر M_1 دارای منحنی مشخصهٔ شکل مساله 3 و جریان دهی M_2 یک دهم جریان دهی M_1 باشد، خط بار مدار را ترسیم و بهترین نقطهٔ کار را مشخص نمائید. بهرهٔ ولتاژ مدار را از روی منحنی بدست آورید. بیشینهٔ دامنهٔ نوسان ولتاژ خروجی چقدر است؟ (در واقع منحنی مشخصهٔ M_2 مشابه منحنی مشخصهٔ M_1 ، منتهی محور جریان آن به یک دهم مقادیر محور جریان منحنی M_1 تقلیل یابد).

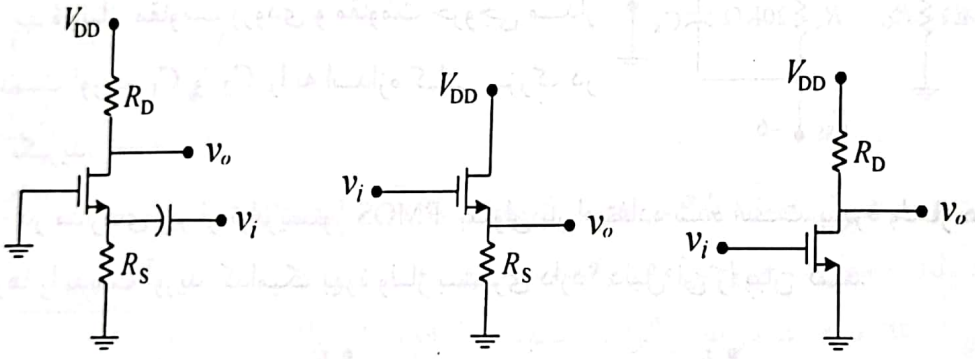


۱۷- معمولاً در مدارهای مجتمع از سری کردن ترانزیستورهای MOS که گیت و درین آنها بهم متصل است، مقسم ولتاژ می سازند. در مقسم ولتاژ زیر، نسبت W/L ترانزیستورها را چقدر انتخاب کنیم تا $V_A = 4$ و $V_B = 9$ ولت گردد؟

$V_T = 1$ ولت، $\lambda = 0$ ، $K' = 20\,\mu A/V^2$ و از اثر بدنه بر روی ولتاژ آستانه صرفنظر کنید. W/L ترانزیستور M_2 را برابر یک انتخاب کنید.

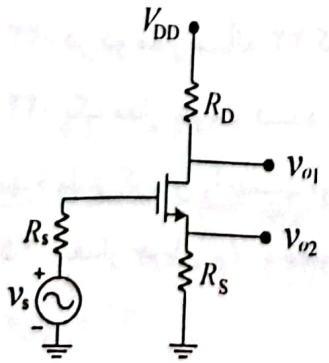


۱۸- شکل صفحهٔ بعد مدار تقویت کننده های سورس مشترک، درین مشترک و گیت مشترک ترانزیستور MOS را نشان می دهد. رابطهٔ بهرهٔ ولتاژ و مقاومت خروجی را برای هر یک از آنها

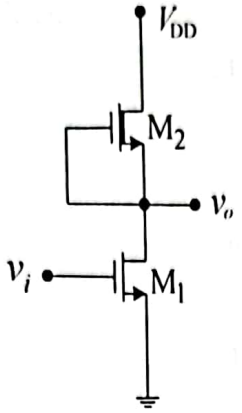


محاسبه کنید. از ترسیم مدار تأمین گرایش در تمام این شکل ها صرفنظر شده است.

۱۹- مدار یک جداکنندهٔ فاز با ترانزیستور MOS در شکل زیر ارائه شده است. مطلوبست تعیین رابطهٔ ولتاژ خروجی برای v_{o1} و v_{o2} و مشخص کردن اختلاف آنها. اگر جریان نقطهٔ کار مدار $1mA$ ، $\lambda = 0.01$ بر ولت و $\beta = 1\,mA/V^2$ باشد، مقدار بهرهٔ ولتاژ را به ازای $R_D = R_S = 2.2\,K\Omega$ بدست آورید.



۲۰- رابطهٔ بهرهٔ ولتاژ و مقاومت خروجی مدار شکل زیر را که در آن بار از نوع تخلیه ای است بدست آورید.

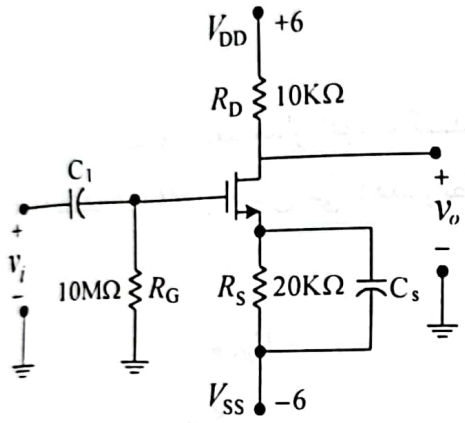


۲۱- مدار شکل روبه رو مفروض است:

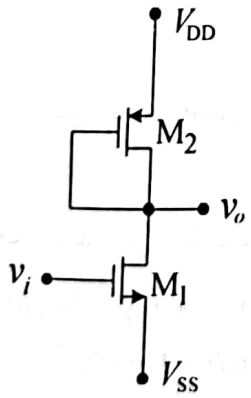
الف- جریان و ولتاژ نقطهٔ کار مدار را تعیین کنید.

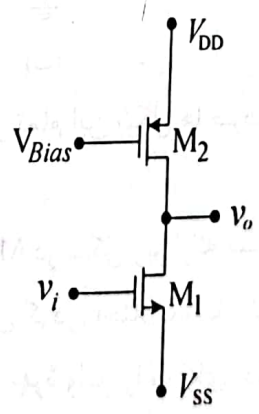
$V_T = 1, \beta = 0.1\,mA/V^2, \lambda = 0.02\,V^{-1}$ ولت است.

ب- بهرهٔ ولتاژ، مقاومت ورودی و مقاومت خروجی مدار را بدست آورید. C_1 و C_2 را به اندازه کافی بزرگ در نظر بگیرید.



۲۲- در مدارهای زیر از ترانزیستور PMOS بعنوان بار استفاده شده است. بهرهٔ ولتاژ هر یک از مدارها را بدست آورید. کدامیک بهرهٔ ولتاژ بیشتری دارد؟ دلیل آن را بیان کنید.



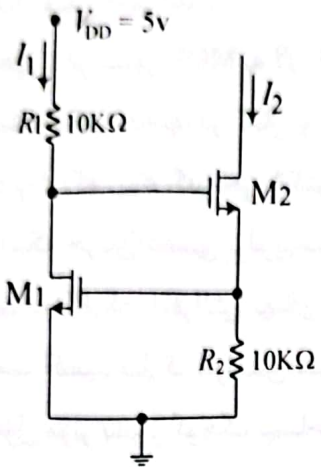


۲۳- در دو مدار مسأله ۲۲ کدامیک مقاومت خروجی کمتری دارد؟ با محاسبه نشان دهید.

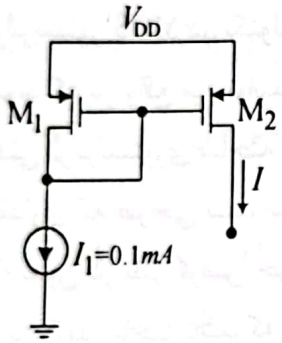
۲۴- یک مدار تقویت کنندهٔ دو طبقه با ترانزیستور MOS ببندید (کاملاً به دلخواه)، سپس رابطهٔ بهرهٔ ولتاژ کل آن را بدست آورید. ساخت تقویت کننده با MOS ساده تر است یا با BJT؟

۲۵- مقدار جریان I_2 و مقاومت خروجی منبع جریان شکل صفحهٔ بعد را بدست آورید.

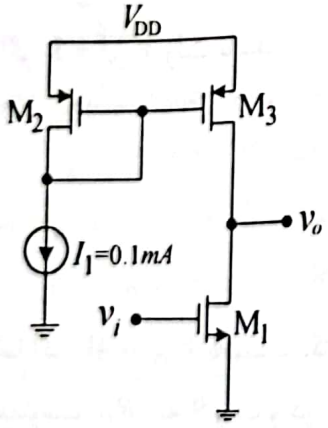
$\lambda = 0.01V^{-1}$ ، $V_T = 1, \beta_1 = \beta_2 = 0.5\,mA/V^2$ ولت و ترانزیستورها به ازای تمام شرایط در منطقهٔ اشباع هستند.



۲۶- اگر ترانزیستورهای M_1 و M_2 در شکل زیر کاملاً مشابه باشند، مقدار جریان I چقدر است؟ ($\lambda = 0$ فرض شود).



۲۷- اگر از منبع جریان مسأله ۲۵ در تقویت کنندهٔ شکل زیر استفاده شود، بهرهٔ ولتاژ و مقاومت خروجی مدار را بدست آورید. λ_2 و λ_3 صفر ولی $\lambda_1 = 0.01V^{-1}$ در نظر گرفته شود. $\beta_1 = 0.1\,mA/V^2$ است.



۹.۱۴ حل بعضی از مسائل فصل نهم

-۴

$$v_{DS} > v_{GS} - V_T$$

چون گیت و سورس بهم متصل است، $v_{GS} = 0$ می باشد و در نتیجه برای کار در منطقهٔ اشباع باید:

$$v_{DS} > 2V$$

$$I_{DS} = \frac{\beta}{2}(v_{GS} - V_T)^2 = \frac{0.5}{2}(2)^2 = 1mA$$

از آنجا که $\lambda = 0$ است، بنابراین ترانزیستور حکم یک منبع جریان را خواهد داشت که جریان آن مقدار ثابت یک میلی آمپر است.

۶- جریان دهی ترانزیستور MOS به β که $K'W/L$ است بستگی دارد. $K' = \mu C_0$ است که μ در واقع قابلیت حرکت حاملها در کانال و C_0 خازن اکسید نازک گیت بازای واحد سطح گیت است ($C_o = \varepsilon_{ox}/d_{ox}$ ، که ε_{ox} گذردهی الکتریکی اکسید سیلیسیم و d_{ox} ضخامت اکسید نازک گیت است). برای اینکه جریان دهی ترانزیستور MOS را زیاد کنیم لازم است نسبت W/L و K' را افزایش دهیم. W/L که با افزایش پهنای MOS و کاهش طول آن افزایش می یابد. K' نیز با کاهش ضخامت اکسید نازک افزایش می یابد. در تکنولوژی MOS افزارهایی چون VMOS و DMOS با طول مؤثر بسیار کوچک ساخته می شوند که جریان دهی بالایی دارند و از نظر ولتاژهای شکست نیز طوری ساخته شده اند که قابلیت کار در جریان و ولتاژهای بالا را دارند. ترانزیستور MOS در تکنولوژی CMOS نیز با ابعاد و ضخامت اکسید بسیار کوچک ساخته می شوند که در واقع می توانند جریان مورد نیاز را با مساحت و ولتاژهای پائین برآورده سازند. البته وقتی ترانزیستوری ساخته شد، آنگاه با تغییر ولتاژ نیز تا حدی می توان مقدار جریان را حول مقداری که طراحی شده است، کم و زیاد کرد.

۷- بدون در نظر گرفتن جریان زیر ولتاژ آستانه، می توان فرض کرد که به ازای $V_{GS} = V_T$ ، جریان درین آنقدر ناچیز باشد که صفر در نظر گرفته شود. بنابراین:

$$I_{DSQ} = 0 \ , \ V_{DSQ} = 10V$$

اگر $V_{GS} = 3$ ولت باشد،

$$I_{DSQ} = \frac{\beta}{2}(V_{GS} - V_T)^2$$

$$I_{DSQ} = 0.1 {}^{mA}\!/_{V^2} \, (3-1)^2 = 0.4mA$$

$$V_{DSQ} = 6V \, , V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

اما اگر $V_{GS} = 4V$ باشد، با بکارگیری رابطهٔ فوق جریان به 0.9 میلی آمپر می رسد که افت ولتاژ مقاومت R_D به 9 ولت و در نتیجه $V_{DSQ} = 1$ ولت می گردد که شرط وجود نقطهٔ کار در منطقهٔ اشباع برقرار نخواهد بود، لذا نمی توانیم از رابطهٔ بالا برای محاسبهٔ جریان استفاده کنیم و باید از رابطهٔ ناحیهٔ تریودی برای محاسبهٔ جریان استفاده کرد.

$$I_D = \beta \left[(V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}}{2} \right]$$

از طرفی:

$$V_{DD} = I_D R_D + V_{DS}$$

از حل معادله های فوق برای V_{DS} دو جواب 2 و 5 ولت بدست می آید که $V_{DS} = 2$ ولت جواب درست است.

$$V_{DSQ} = 2V$$
$$I_{DQ} = 0.8mA$$

۱۱- ترانزیستور M_2 به دلیل اینکه گیت و درین آن بهم متصل است، همیشه در اشباع می باشد. بنابراین M_2 به ازای تمام مقادیر v_i در منطقهٔ اشباع باقی می ماند. اگر $v_i < 1V$ باشد، M_1 قطع، جریان مدار صفر و v_o بیشترین مقدار خود را که $V_{DD} - V_T$ است، خواهد داشت.
با افزایش v_i بطوریکه $v_i > 1V$ گردد، M_1 هدایت نموده ولی در ابتدای هدایت بدلیل اینکه $v_{DS_1} = v_o > v_i - 1$ است، در منطقهٔ اشباع می باشد. بنابراین هر دو ترانزیستور M_1 و M_2 در اشباع هستند. از آنجائیکه جریان ترانزیستورها برابرند، خواهیم داشت:

$$\frac{1}{2}\beta_1(v_i - V_T)^2 = \frac{1}{2}\beta_2(v_{GS_2} - V_T)^2$$

در این محاسبات از اثر بدنه بر روی ولتاژ آستانه ترانزیستور M_2 صرفنظر می شود. با توجه به اینکه $v_{GS_2} = V_{DD} - v_o$ است، خواهیم داشت:

$$\sqrt{\beta_1}(v_i - V_T) = \sqrt{\beta_2}(V_{DD} - v_o - V_T)$$

تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب ورودی را می توان با مشتق گیری از این رابطه بدست آورد.

$$\frac{\partial v_o}{\partial v_i} = -\sqrt{\frac{\beta_1}{\beta_2}}$$

این ضریب در واقع بهرهٔ ولتاژ مدار در منطقهٔ $1 < v_i < v_o + V_T$ است، زیرا خارج از این ناحیه ترانزیستور M_1 در منطقهٔ تریودی خواهد بود. بنابراین با افزایش v_i بطوریکه $v_i > v_o + V_T$ باشد، M_1 وارد منطقهٔ تریودی خواهد شد. مقدار v_i را می توان با قرار دادن $v_i = v_o + V_T$ در رابطهٔ فوق بدست آورد که $v_i = 1.96V$ نتیجه می شود. بنابراین برای $v_i > 1.96V$ خواهیم داشت:

$$\beta_1\left[(v_i - V_T)v_o - \frac{{v_o}^2}{2}\right] = \frac{1}{2}\beta_2(v_{GS_2} - V_T)^2$$

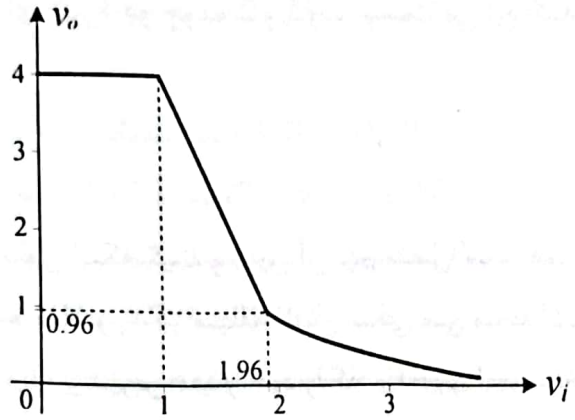
با جایگذاری مقادیر خواهیم داشت:

$$1\times\left[(v_i - 1)v_o - \frac{{v_o}^2}{2}\right] = 0.05(V_{DD} - v_o - 1)^2$$

با ساده کردن این معادله، رابطهٔ زیر بدست می آید که قابل ترسیم است.

$$0.55{v_o}^2 + 0.6v_o + 0.8 = v_o v_i$$

بنابراین منحنی تغییرات v_o بر حسب v_i را می توانیم به شکل صفحهٔ بعد ترسیم نمائیم.



۱۷- تمام ترانزیستورها در منطقهٔ اشباع هستند.

$$I_{DS} = \frac{\beta_2}{2}(v_{GS_2} - V_{T_2})^2$$

$$I_{DS} = \frac{1}{2}K'_2\left(\frac{W}{L}\right)_2(5-1)^2$$

$$I_{DS} = 8 \times 20 \times 1 = 160\mu A$$

$$I_{DS} = \frac{\beta_1}{2}(v_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{\beta_1}{2}(4-1)^2$$

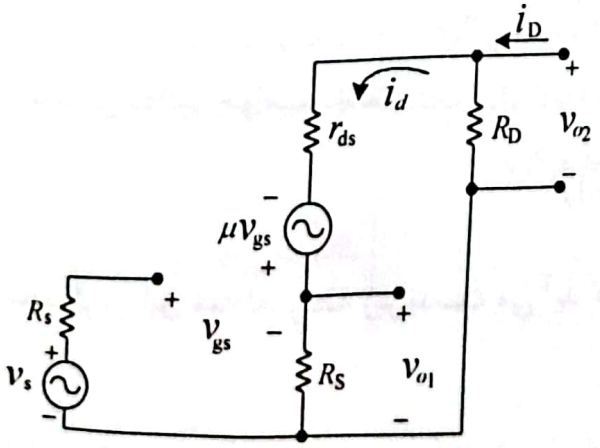
$$\beta_1 = \frac{2 \times 160}{9} = K'\left(\frac{W}{L}\right)_1$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_1 = \frac{16}{9}$$

$$\beta_3 = \frac{2 \times 160}{4} = 80 = K'\left(\frac{W}{L}\right)_3$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_3 = 4$$

۱۹- ابتدا مدار معادل را ترسیم می کنیم.



$$v_{gs} = v_s - i_d R_S$$
$$\mu v_{gs} = i_d (R_S + r_{ds} + R_D)$$
$$v_{o_1} = i_d R_S$$
$$v_{o_2} = -i_d R_D$$

با جابه جا کردن متغیرها رابطهٔ ولتاژ خروجی بر حسب ورودی به شکل زیر حاصل می شود:

$$A_{v_1} = \frac{v_{o_1}}{v_s} = \frac{\mu R_S}{r_{ds} + R_D + (1+\mu)R_S} \quad , \mu = g_m r_{ds}$$

$$A_{v_2} = \frac{v_{o_2}}{v_s} = \frac{-\mu R_D}{r_{ds} + R_D + (1+\mu)R_S}$$

با توجه به جریان نقطهٔ کار و مقادیر داده شده می توان r_{ds} و g_m را بدست آورد.

$$r_{ds} = \frac{1}{\lambda I_{DS}} = \frac{1}{0.01 \times 1mA} = 100K\Omega$$
$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = \sqrt{2 \times 1 \times 1} = 1.4m\Omega^{-1}$$
$$\mu = 140$$
$$A_{v_1} = \frac{140 \times 2.2}{100 + 2.2 + 141 \times 2.2} = \frac{308}{412.4} = 0.746$$
$$A_{v_2} = -0.746$$

بنابراین به دلیل برابر بودن R_S و R_D ، $|A_{v_1}|$ و $|A_{v_2}|$ مساوی ولی سیگنال v_{o_1} و v_{o_2} نسبت بهم 180 درجه اختلاف فاز دارند.

۲۱- ابتدا بدون در نظر گرفتن λ ، نقطهٔ کار را پیدا می کنیم.

الف-

$$V_{GS} + I_D R_S = 6$$
$$I_D = \frac{\beta}{2}(V_{GS} - V_T)^2$$

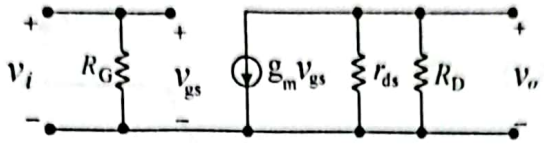
از حل این دو رابطه V_{GS} و I_D بدست می آید:

$$V_{GS} = 2.8V, \quad I_D = 0.16mA \quad , \quad V_{DSQ} = 7.2V$$

حال که حدود V_{DSQ} معلوم است و فرض در منطقهٔ اشباع بودن ترانزیستور درست است، جریان را با در نظر گرفتن λ بدست می آوریم.

$$I_D = \frac{\beta}{2}(V_{GS} - V_T)^2(1 + \lambda V_{DS})$$
$$I_D = 0.165mA, \quad V_{DSQ} = 7.05V \quad , \quad V_{GS} = 2.7V$$

بطوریکه مشاهده می شود با احتساب λ ، نتیجه چندان تغییر نمی کند، بنابراین نیازی به تکرار مسأله نیست. مدار معادل را ترسیم می کنیم.



$$v_o = -g_m v_{gs}(r_{ds} \| R_D)$$
$$v_i = v_{gs}$$
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_m}{g_{ds} + g_D} \qquad g_D = \frac{1}{R_D} \ , \ g_{ds} = \frac{1}{r_{ds}}$$

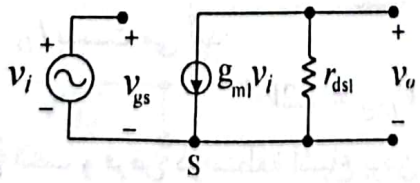
با توجه به مقدار λ:

$$r_{ds} = \frac{1}{0.02 \times 0.165} = 303K\Omega$$
$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = \sqrt{2 \times 0.1 \times 0.165} = 0.18m\Omega^{-1}$$
$$A_v = -\frac{0.18m\Omega^{-1}}{0.1m\Omega^{-1}} = -1.8$$
$$R_i = R_G = 10M\Omega$$

برای محاسبهٔ R_o باید منبع ولتاژ ورودی را صفر کنیم که موجب صفر شدن v_{gs} و در نتیجه صفر شدن منبع جریان $g_m v_{gs}$ می گردد، بنابراین:

$$R_o = R_D \| r_{ds} \approx R_D = 10K\Omega$$

۲۷- با توجه به اینکه ترانزیستورهای M_2 و M_3 کاملاً مشابه هستند و λ نیز صفر است، بنابراین $I_{D_3} = I_{D_2} == 0.1$ میلی آمپر است، با توجه به اینکه ترانزیستور M_3 حکم منبع جریان ایده آل را دارد، مدار معادل به شکل زیر ترسیم می شود، یعنی تغییرات جریان M_1 نمی تواند از M_3 بگذرد، چون جریان آن کاملاً ثابت است، بنابراین به شکل مقاومت بینهایت در مدار معادل در نظر گرفته می شود.



$$\frac{v_o}{v_i} = -g_m r_{ds_1} = -\mu_1$$
$$r_{ds_1} = \frac{1}{\lambda I_{DS_1}} = 1M\Omega \ , \ g_m = \sqrt{2\beta_1 I_{DS_1}} = 0.14m\Omega^{-1} \ , \ A_v = -141$$