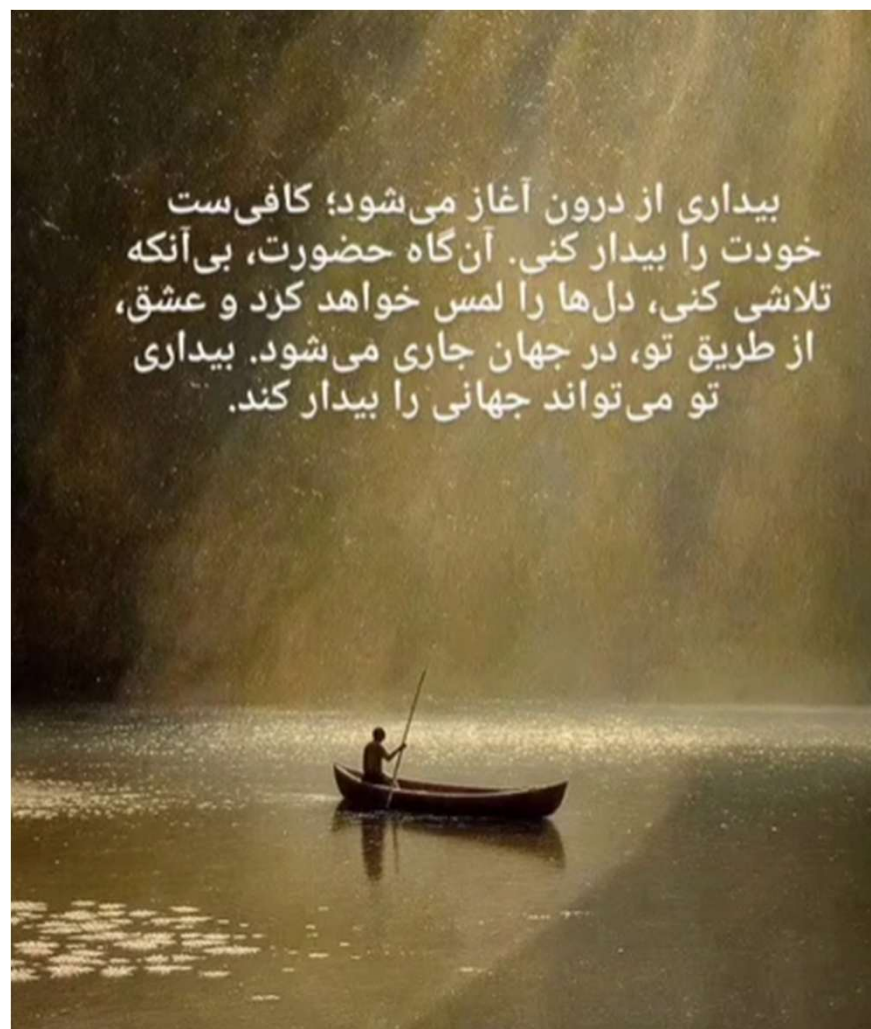


بسمه تعالی



فصل سوم

مبانی الکترونیک (معرفی دیود و ترانزیستور)



دانشگاه سمنان

دانشگاه سمنان
Semnan University

پردیس فرزندان

مقدمه ای بر فیزیک الکترونیک

موارد موجود در طبیعت به سه دسته تقسیم می شوند:

(۳) نیمه هادی

(۲) عایق

(۱) هادی

هادی ها رسانای جریان برق هستند و فاصله بین باند هدایت و باند ظرفیت در آنها بسیار کم بوده و الکترون به راحتی می تواند از باند ظرفیت به باند هدایت برود. فلزات همگی در دسته هادی قرار می گیرند. مانند طلا، مس، نقره

عایق ها نارسانای جریان برق هستند و فاصله باند هدایت و باند ظرفیت آنقدر زیاد هست که تعداد الکترون هایی که از باند ظرفیت به باند هدایت می روند ناچیز بوده و در نتیجه جریان بسیار کمی برقرار می شود. نمونه ای از عایق ها مانند چوب، پلاستیک

نیمه هادی در واقع یک ماده است که بیشتر از یک عایق (مانند شیشه) اما کم تر از یک هادی خالص (مانند مس یا آلومینیوم) برق را انتقال می دهد و معمولاً از سیلیکون تشکیل شده است. نیمه هادی ها عناصر گروه چهارم جدول تناوبی هستند.

نیمه هادی ها که به عنوان **نیمه رسانا** نیز شناخته می شوند، به دلیل نقش آن ها در ساخت وسایل الکترونیکی، قسمت مهمی از زندگی ما هستند.

نیمه هادی ها تأثیر به سزایی در جامعه ما داشته اند.

نیمه هادی ها را در قلب تراشه های ریزپردازنده و هر چیزی که رایانه ای باشد یا از امواج رادیویی استفاده کند، می بینیم.

امروزه بیشتر تراشه های نیمه هادی و ترانزیستورها با سیلیکون ساخته می شوند.

سیلیکون قلب هر وسیله الکترونیکی است.



کربن، سیلیسیم و ژرمانیم (ژرمانیم، مانند سیلیکون یک نیمه هادی است) در ساختار الکترون خود از ویژگی منحصر به فردی برخوردار هستند.

هر کدام در مدار خارجی خود دارای چهار الکترون هستند. این اجازه می دهد تا آن ها به شکل کریستال دربیایند.

چهار الکترون پیوند کووالانسی کامل با چهار اتم همسایه تشکیل می دهند و یک شبکه ایجاد می کنند.

در یک شبکه سیلیکونی، تمام اتم های سیلیکون کاملاً به چهار همسایه متصل می شوند و هیچ الکترون آزادی برای هدایت جریان الکتریکی باقی نمی ماند.

5 B Boron 2.34	6 C Carbon 2.62	7 N Nitrogen 1.251
13 Al Aluminum 2.70	14 Si Silicon 2.33	15 P Phosphorus 1.82
31 Ga Gallium 5.91	32 Ge Germanium 5.32	33 As Arsenic 5.72

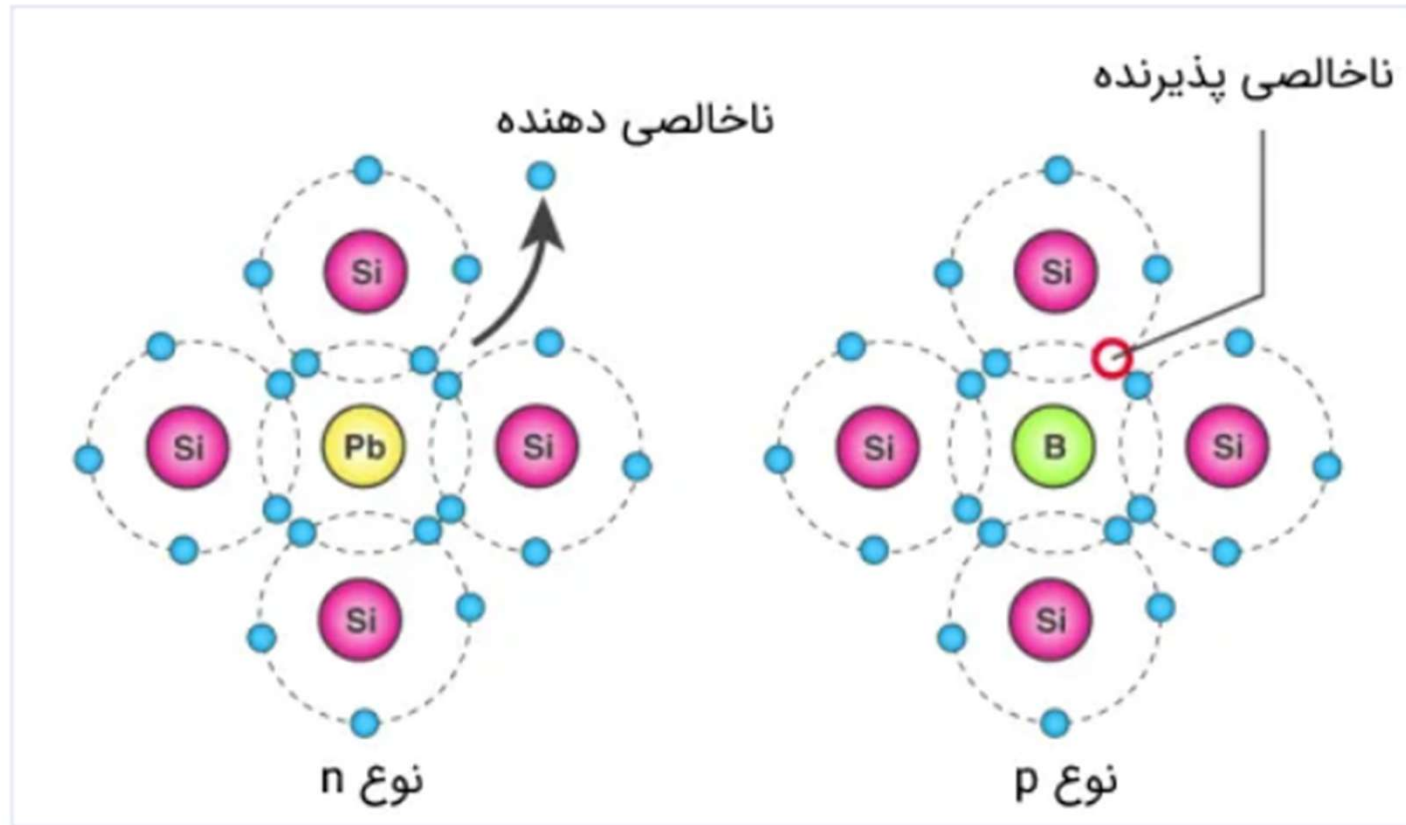
یک کریستال خالص سیلیکون تقریباً یک عایق است و برق بسیار کمی از آن عبور می کند؛ اما می توان از طریق فرآیندی به نام دوپینگ رفتار آن را تغییر داد. با دوپینگ (اضافه کردن ناخالصی) می توانید رفتار سیلیکون را تغییر داده و به هادی تبدیل کرد. در دوپینگ، مقدار ناخالصی کمی را به عناصر گروه چهارم تزریق می شود. پس دو نوع نیمه هادی داریم.

نیمه هادی نوع n:

وقتی به عناصر گروه چهارم، عناصر گروه پنجم جدول تناوبی مانند فسفر یا آرسنیک که در اتم خارجی خود ۵ الکترون دارند را تزریق کنیم نیمه هادی نوع n ایجاد می شود. ۴ الکترون از ۵ الکترون آن پیوند خورده و یک الکترون آزاد باقی می ماند. در این نیمه هادی الکترون ها حامل های اکثریت و حفره ها حامل های اقلیت هستند.

نیمه هادی نوع p:

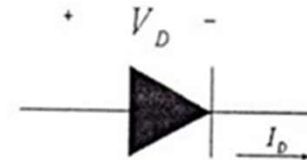
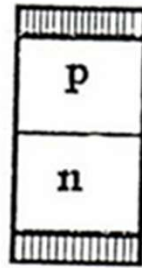
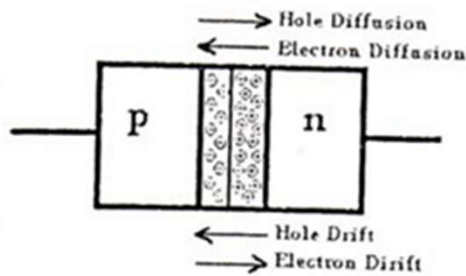
وقتی به عناصر گروه چهارم، عناصر گروه سوم جدول تناوبی مانند بور یا گالیم که در اتم خارجی خود ۳ الکترون دارند را تزریق کنیم نیمه هادی نوع p ایجاد می شود. ۳ الکترون ظرفیت پیوند ناخالصی با ۳ الکترون آن نیمه هادی پیوند خورده و باعث عدم وجود الکترون (حفره) در ناخالصی می شود. با افزایش تعداد ناخالصی ها، حفره ها یا حامل های بار مثبت افزایش می یابند. از این رو به آن نیمه هادی نوع p گفته می شود. در این نیمه هادی حفره ها حامل های اکثریت و الکترون ها حامل های اقلیت هستند.



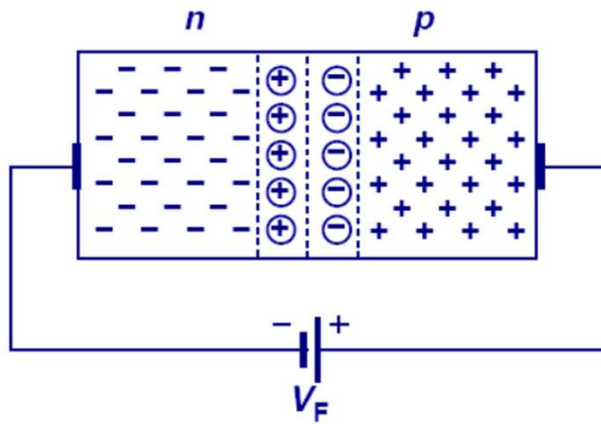
معرفی دیود

دیود با اتصال نیمه هادی نوع n با نیمه هادی نوع P به وجود می آید.

پس از تشکیل اتصال $p-n$ تعدادی از الکترونهای ناحیه n نزدیک اتصال جذب همان تعداد حفره های ناحیه p نزدیک اتصال شده و آنها را پر می کنند. بنابراین در دو طرف اتصال لایه ای خالی از الکترون و حفره تشکیل می شود که به آن لایه تخلیه (depletion layer) اطلاق می شود.



بایاس مستقیم دیود



اگر ولتاژ p نسبت به n به وسیله ولتاژ منبع مثبت شود، دیود در حالت بایاس مستقیم قرار گرفته و عرض لایه تخلیه کاهش یافته و مقاومت دیود بسیار کم می شود. همچنین جریان حاملهای اکثریت افزایش می یابد با نفوذ الکترونها به ماده p و حفره های n (در جهت مخالف یکدیگر) یک جریان در جهت قرار دادی (خلاف جهت حرکت الکترونها و هم جهت حفره ها) از p به n به وجود می آید. رابطه این جریان با ولتاژ دو سر دیود طبق فرمول ۴-۱ به صورت نمائی است:

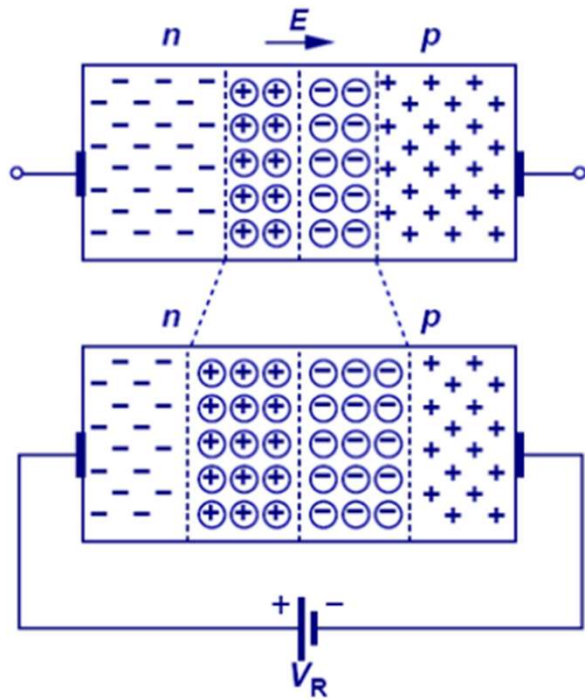
$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) \quad (4-1)$$

در این فرمول n بستگی به جنس دیود دارد و بین ۱ و ۲ است. V_T ولتاژ حرارتی نامیده می شود و برابر با $\frac{kT}{q}$ است و در درجه حرارت معمولی اطاق حدود ۲۶mV است. I_S جریان اشباع معکوس دیود است.

بایاس معکوس دیود

اگر ولتاژ p نسبت به n منفی باشد، دیود بایاس معکوس دارد و عرض لایه تخلیه افزایش می یابد. جریانهای نشتی که به وسیله حاملهای اقلیت ایجاد می شود بیشتر از جریانهای پخشی خواهند شد. چون جریان بایاس معکوس عمدتاً به وسیله حاملهای اقلیت ایجاد شده است، مقدار آن بسیار ناچیز است و دیود مانند یک ماده عایق عمل می کند. برای $V_D \ll 0$ هم، I_D از فرمول ۴-۱ به دست می آید که نتیجه آن فرمول ۴-۲ است و به این علت به I_S جریان اشباع معکوس گفته می شود.

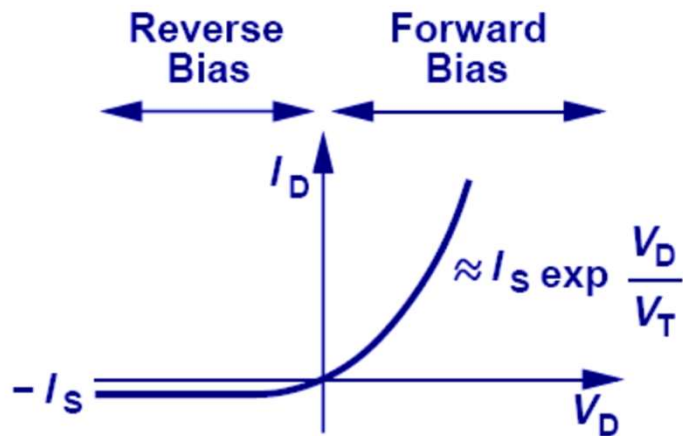
$$I_D = -I_S \quad (\text{برای } V_D \ll 0) \quad (4-2)$$



مشخصه ولتاژ جریان دیود

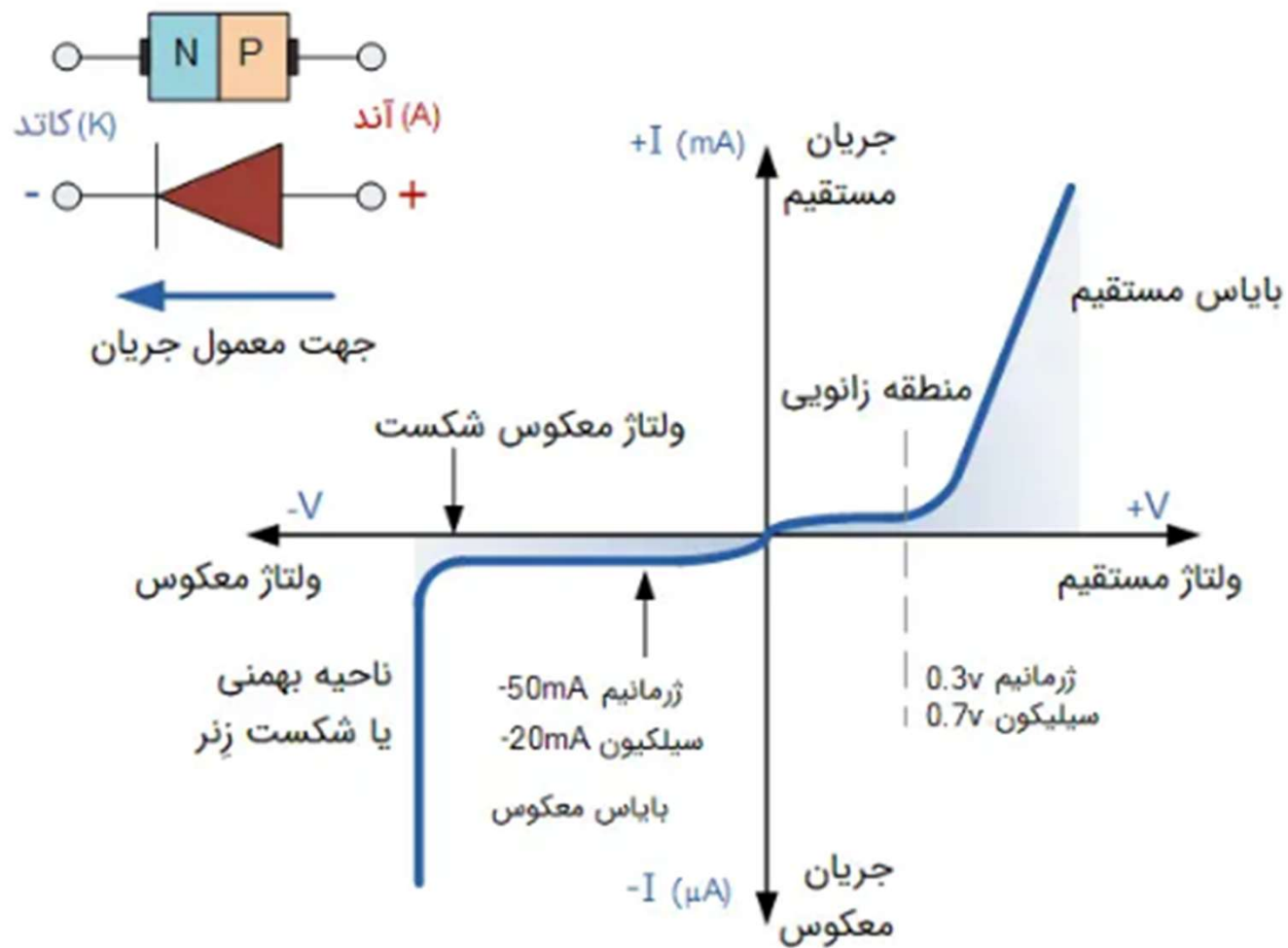
دیود در حالت بایاس مستقیم به ازای ولتاژهای کوچکتر از ولتاژ آستانه، جریان کمی از خود عبور می دهد. اما به محض افزایش ولتاژ طوری که از ولتاژ آستانه بیشتر شود، جریان دیود با افزایش خطی و ولتاژ آن به صورت نمایی افزایش می یابد. ولتاژ آستانه برای دیودهای

سیلیکون در حد ۰.۶ تا ۰.۷ و برای دیودهای ژرمانیومی در حد ۰.۲ تا ۰.۳ می باشد.

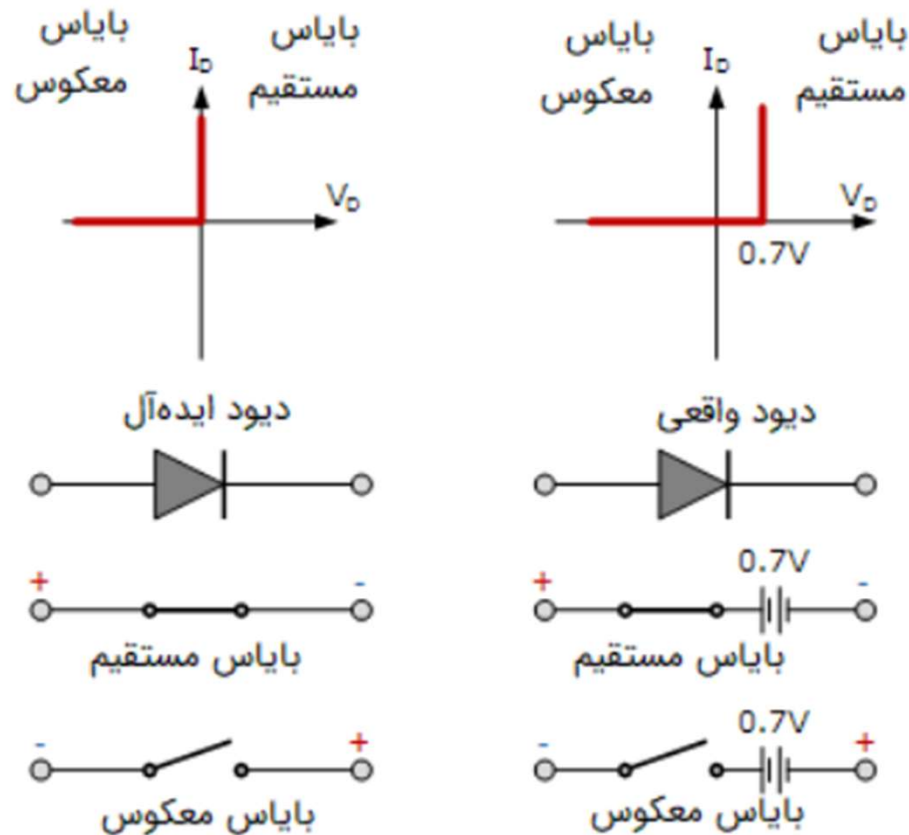


در حالت بایاس معکوس با افزایش ولتاژ معکوس اعمالی جریان دیود از طرف کاتد به آند شروع به افزایش کرده تا نهایتاً به جریان اشباع معکوس برسد. از این به بعد حتی با افزایش ولتاژ معکوس اعمالی

جریان دیود زیاد نمی شود و در مقدار جریان اشباع معکوس باقی می ماند. این جریان برای دیودهای سیسکونی در حد نانوآمپر و دیودهای ژرمانیوم در حد میکروآمپر می باشد.



دیودی که معرفی شد یک عنصر غیرخطی می باشد و باعث می شود که تحلیل مدارات الکترونیکی که در آنها از دیود استفاده می شود، غیر خطی شود. برای حل این مشکل از مدل خطی سازی شده دیود استفاده می کنیم.



روش تحلیل مدارات دیودی

در تجزیه و تحلیل مدارات دیودی ابتدا باید وضعیت دیود و یا دیودهای مدار را از لحاظ روشن یا خاموش بودن تشخیص دهیم. سپس با توجه به مدل فرض شده برای دیود، مدار معادل مناسب را به جای دیودها قرار می دهیم و در نهایت مدارالکتریکی بدست آمده را تحلیل نماییم.

تبصره: در ادامه با توجه به سادگی مدل دیود ایده آل، به صورت پیش فرض در حل مسائل از مدل دیود ایده آل استفاده می کنیم. مگر اینکه در صورت سوال مدل دیگری برای دیود در نظر گرفته شود.

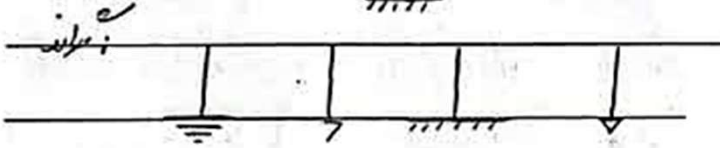
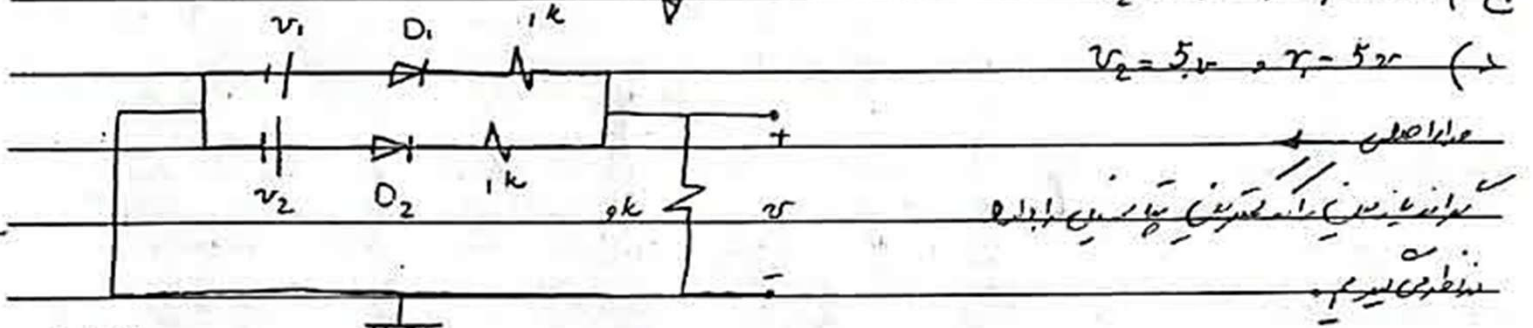
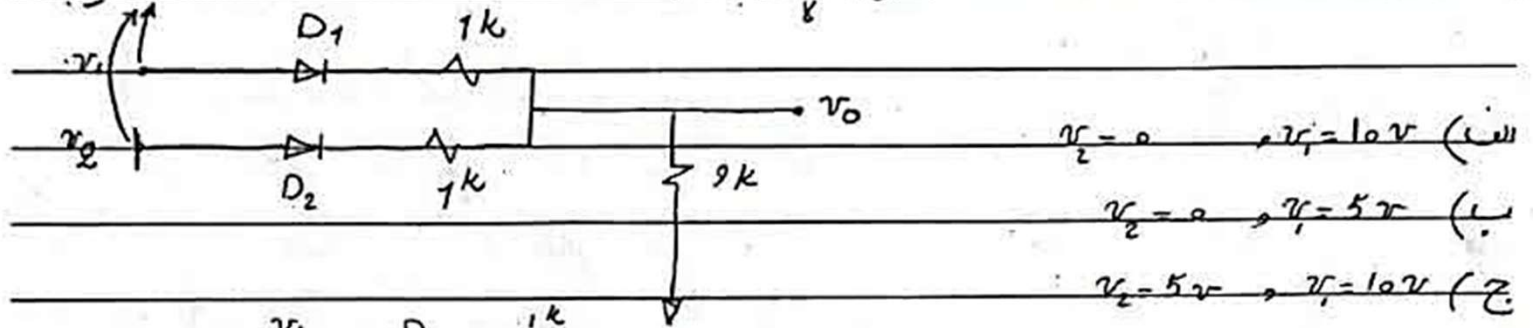
نکته: یک دیود واقعی زمانی روشن می شود که ولتاژ دوسر آن از ولتاژ آستانه بیشتر شود. با توجه به مقدار این ولتاژ در دیود ایده آل $(0.6 - 0.7)$ می توانیم بگوییم یک دیود ایده آل زمانی روشن می شود که ولتاژ دو سر آن مثبت شود.

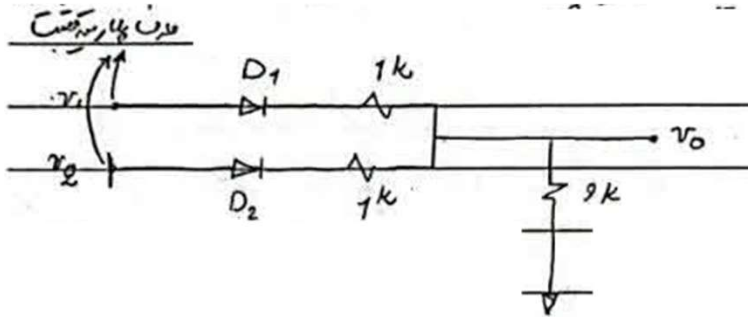
طبیعتا به ازای ولتاژهای منفی دوسر آن، دیود خاموش خواهد بود.



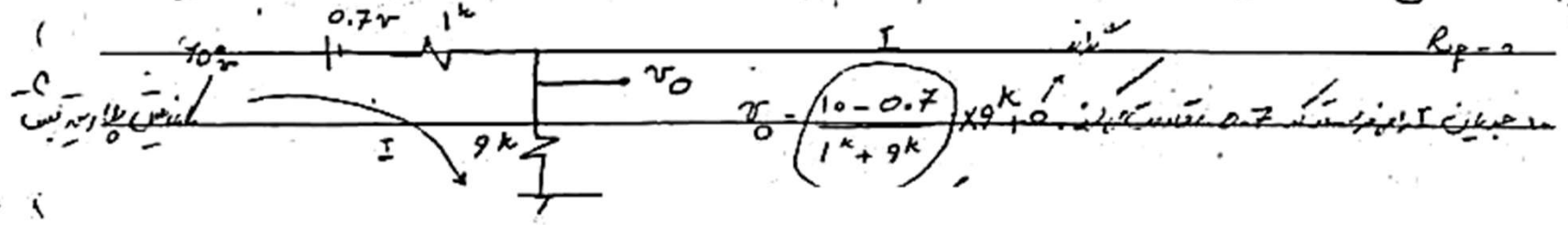
نشان دهید مدار عملی زیر دو دیودهای D_1 و D_2 است. تست خروجی مدار برای مشخصه‌ی الف تا د می‌باشد.

مدون چهار مشخصه
برای $v_1 = 0.7V$ و $v_2 = 0$

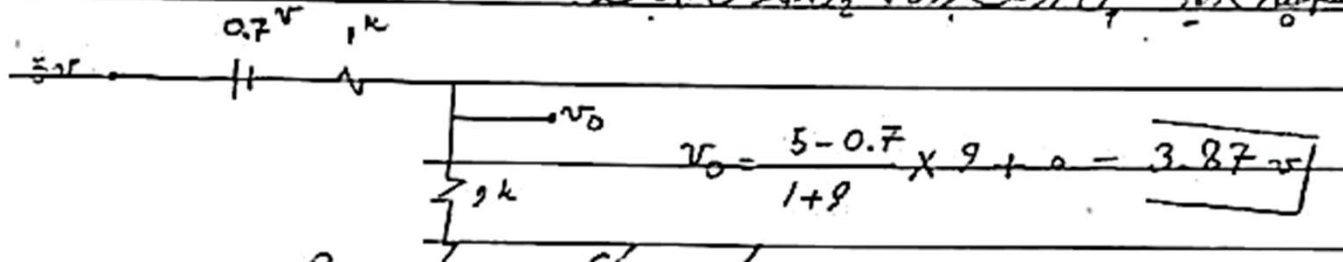




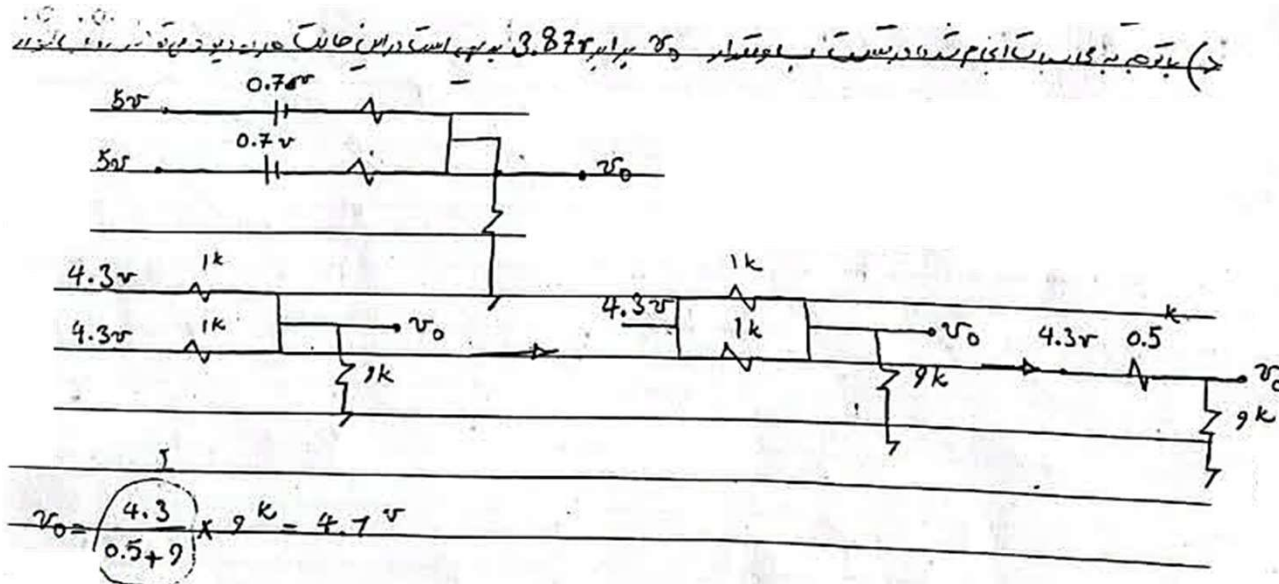
الف) فرض کنید $v_1 = 10V$ و $v_2 = 0V$ (فرض کنید D_1 و D_2 ایده‌آل هستند و ولتاژ افت دیود را در محاسبات خود لحاظ کنید):



ب) فرض کنید $v_1 = 5V$ و $v_2 = 0V$ (فرض کنید D_1 و D_2 ایده‌آل هستند و ولتاژ افت دیود را در محاسبات خود لحاظ کنید):



(ج) درستی و اشتباه بودن مدار را بررسی کنید و در صورت اشتباه بودن مدار را اصلاح کنید.
 اگر اشتباهی در مدار باشد، آن را تصحیح کنید و در صورت درست بودن مدار، آن را تایید کنید.
 مدار در ابتدا به صورت زیر بوده است. در این مدار، ولتاژ خروجی V_o برابر با $8.37V$ است. اما در صورتی که ولتاژ ورودی V_i برابر با $5V$ باشد، ولتاژ خروجی V_o باید برابر با $3.37V$ باشد. این نشان دهنده اشتباه بودن مدار است.
 در این مدار، ولتاژ خروجی V_o برابر با $8.37V$ است. اما در صورتی که ولتاژ ورودی V_i برابر با $5V$ باشد، ولتاژ خروجی V_o باید برابر با $3.37V$ باشد. این نشان دهنده اشتباه بودن مدار است.
 در این مدار، ولتاژ خروجی V_o برابر با $8.37V$ است. اما در صورتی که ولتاژ ورودی V_i برابر با $5V$ باشد، ولتاژ خروجی V_o باید برابر با $3.37V$ باشد. این نشان دهنده اشتباه بودن مدار است.
 در این مدار، ولتاژ خروجی V_o برابر با $8.37V$ است. اما در صورتی که ولتاژ ورودی V_i برابر با $5V$ باشد، ولتاژ خروجی V_o باید برابر با $3.37V$ باشد. این نشان دهنده اشتباه بودن مدار است.
 در این مدار، ولتاژ خروجی V_o برابر با $8.37V$ است. اما در صورتی که ولتاژ ورودی V_i برابر با $5V$ باشد، ولتاژ خروجی V_o باید برابر با $3.37V$ باشد. این نشان دهنده اشتباه بودن مدار است.

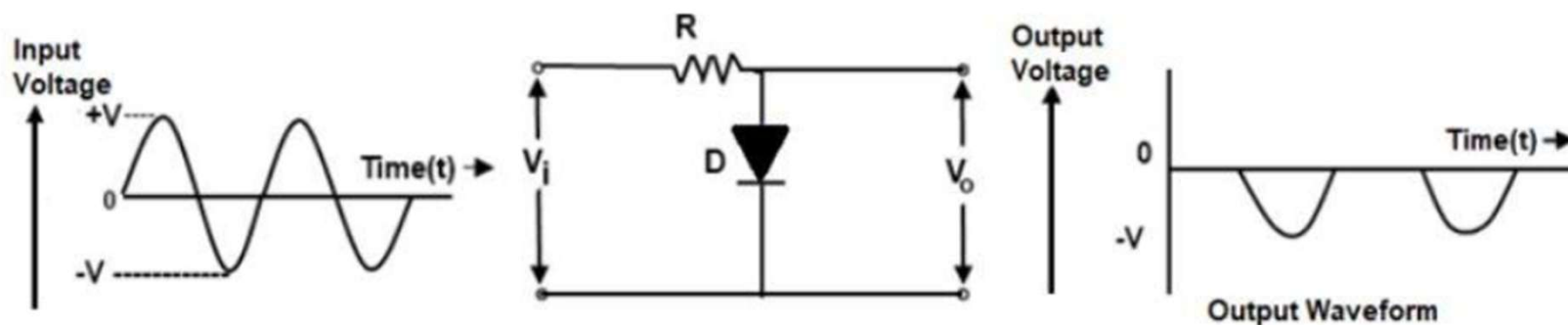


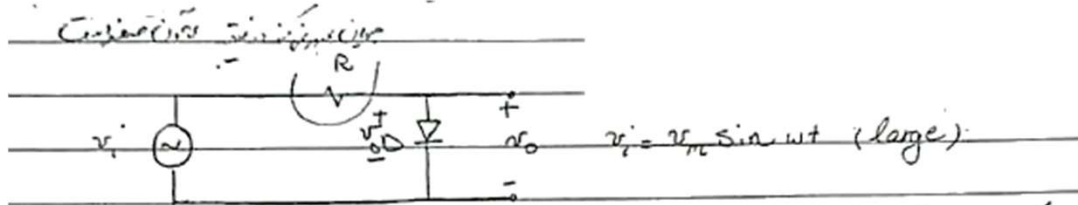
کاربرد دیود به عنوان مدار برشگر

در این مدارات ولتاژ ورودی سینوسی و با دامنه ولتاژ بزرگ (سیگنال بزرگ) می باشد. هدف یافتن ولتاژ خروجی و مشخصه انتقالی است.

مشخصه انتقالی مدار عبارتند از مشخصه سیگنال خروجی بر حسب سیگنال ورودی که معمولا شکل موج ولتاژ خروجی بر حسب ولتاژ ورودی است.

الف) مدار برشگر موازی: در این مدارات دیود بین ورودی و خروجی به صورت موازی قرار می گیرد.





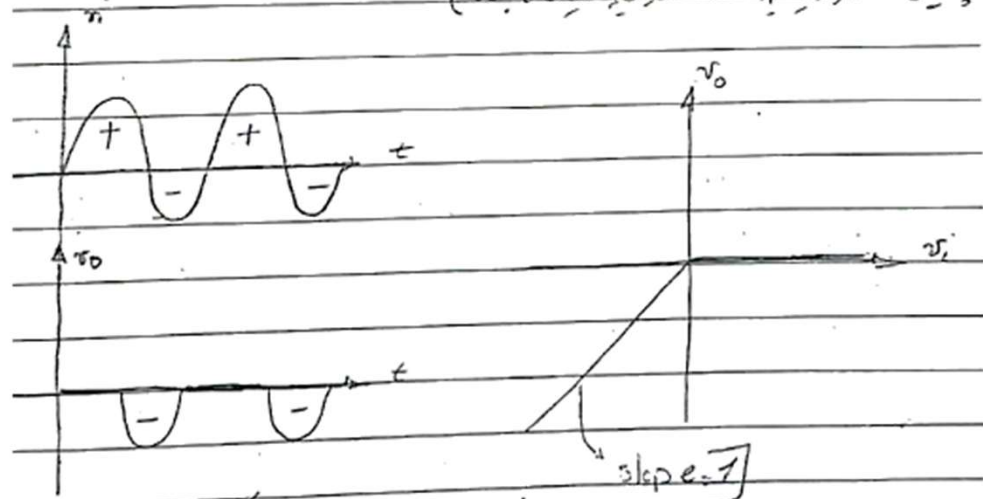
در این مدار، وقتی ولتاژ ورودی مثبت است، دیود به سمت راست هدایت می‌کند و ولتاژ خروجی برابر با ولتاژ ورودی خواهد بود.

 $v_D = v_i$

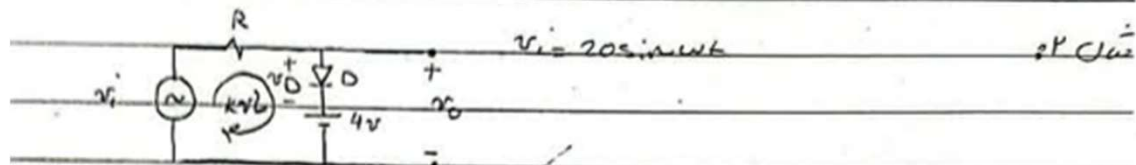
 وقتی ولتاژ ورودی منفی است، دیود به سمت چپ هدایت می‌کند و ولتاژ خروجی صفر خواهد بود.

 $v_o = 0$

 بنابراین، خروجی این مدار یک موج نیمی از موج سینوسی ورودی است.



این مدار یک موج نیمی از موج سینوسی ورودی را به خروجی می‌دهد.



در صورتی که ولتاژ خروجی v_o را می‌خواهیم، باید ولتاژ v_i را از R عبور دهیم.

$$-v_i + v_o + 4 = 0$$

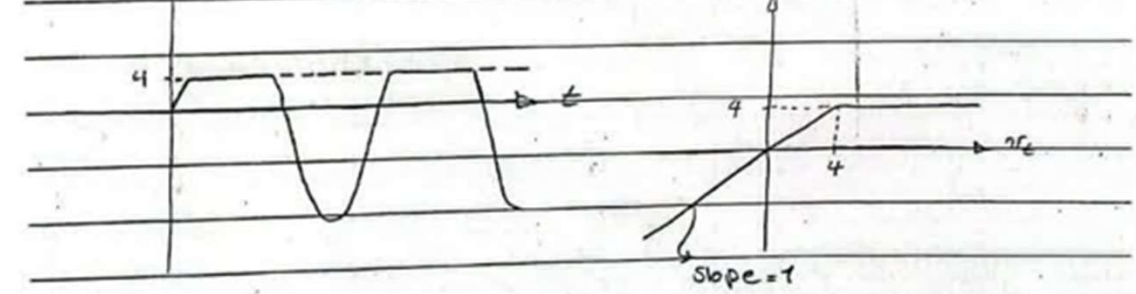
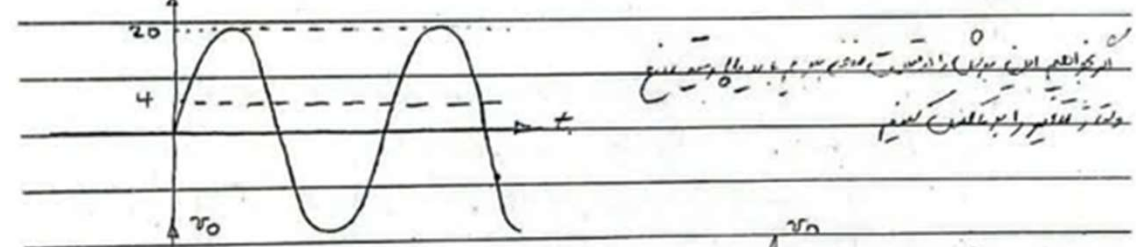
$$v_o = v_i - 4$$

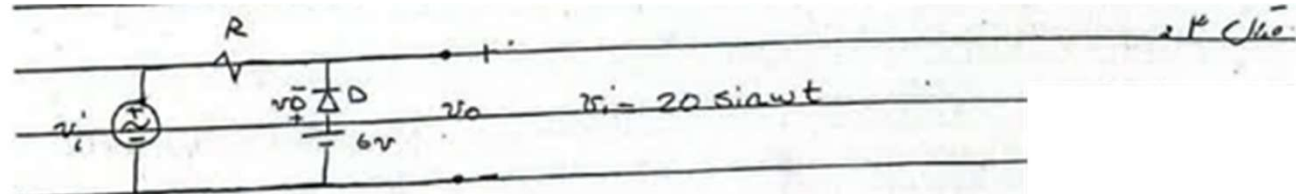
در صورتی که $v_o \geq 0$ باشد:

$$v_o \geq 0 \Rightarrow v_i - 4 \geq 0 \Rightarrow v_i \geq 4 \Rightarrow v_o = v_i - 4$$

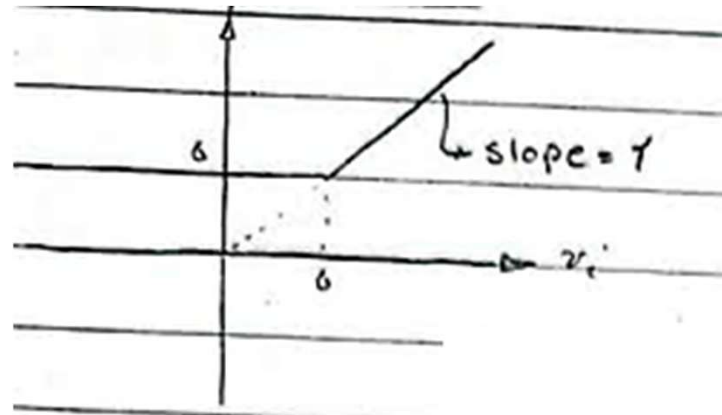
در صورتی که $v_o < 0$ باشد:

$$v_o < 0 \Rightarrow v_i - 4 < 0 \Rightarrow v_i < 4 \Rightarrow v_o = 0$$

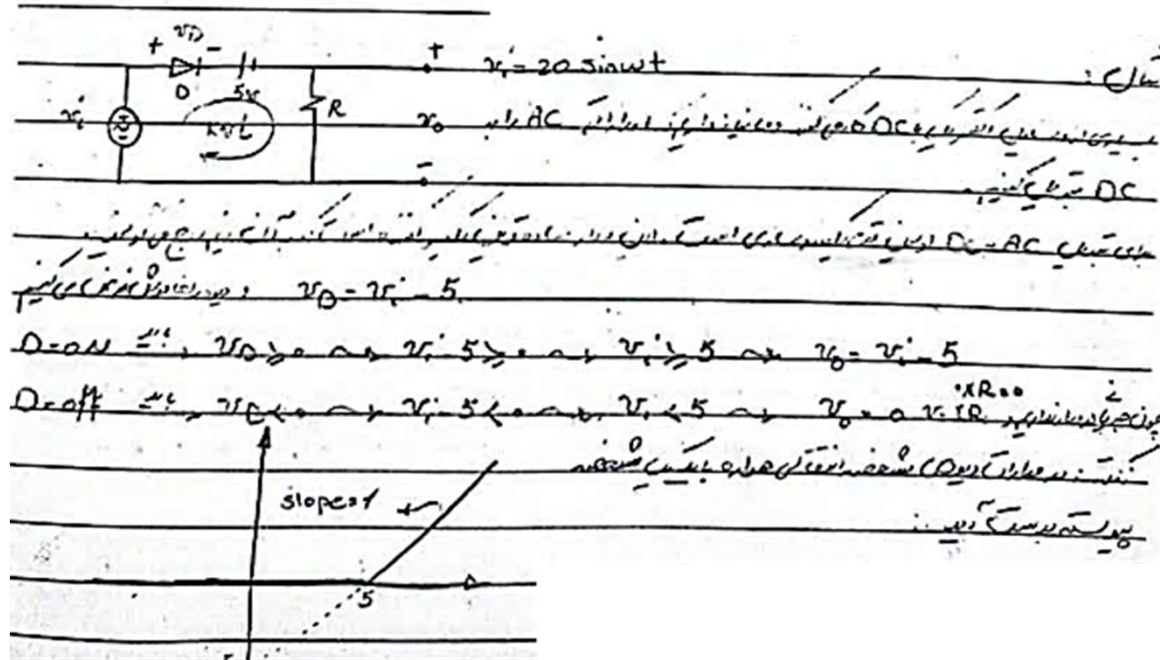
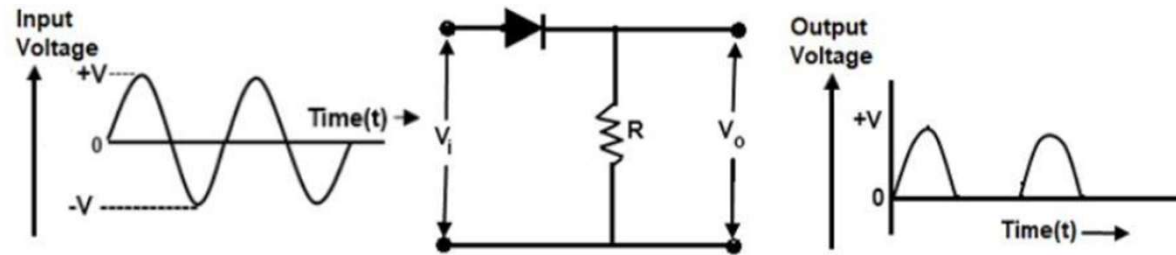




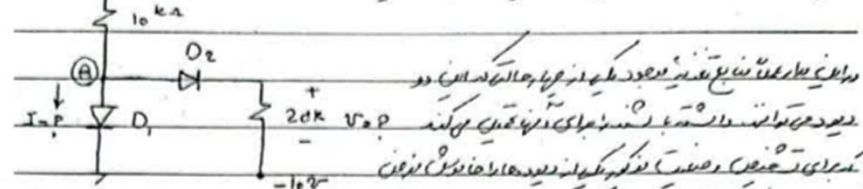
در این مدار: $v_o = 6 - v_i$
 $D = 0 \Rightarrow v_o \geq 6 - v_i \Rightarrow v_i \leq 6 \Rightarrow v_o = 6$
 $D = 1 \Rightarrow v_o < 6 - v_i \Rightarrow v_i > 6 \Rightarrow v_o = v_i$



(ب) مدار برشگر سری: در این مدارات دیود بین ورودی و خروجی به صورت سری قرار می گیرد.



شکل زیر دیودها را در مدار مشخص شده قرار دهید و جهت جریان را مشخص کنید.
 این مدار را در حالت دینامیک و در حالت ایستای حل کنید.



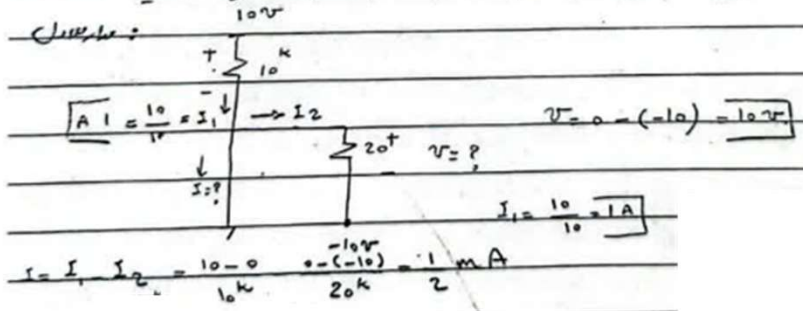
در این مدار، جهت جریان را مشخص کنید و در حالت ایستای حل کنید.
 در حالت ایستای، جهت جریان را مشخص کنید و در حالت دینامیک حل کنید.

$$V_A = \frac{10 - (-10)}{10k + 20k} \times 20k = 10$$

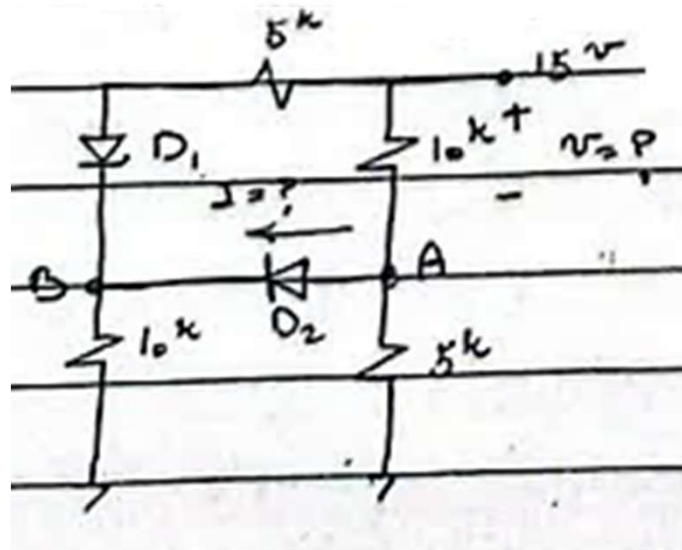
$$V_A = \frac{20 \times 2}{3} - 10 = \frac{10}{3} = 3.3V$$

در این مدار، جهت جریان را مشخص کنید و در حالت ایستای حل کنید.
 در حالت ایستای، جهت جریان را مشخص کنید و در حالت دینامیک حل کنید.
 در حالت ایستای، جهت جریان را مشخص کنید و در حالت دینامیک حل کنید.
 در حالت ایستای، جهت جریان را مشخص کنید و در حالت دینامیک حل کنید.

در این مدار، جهت جریان را مشخص کنید و در حالت ایستای حل کنید.



تمرین



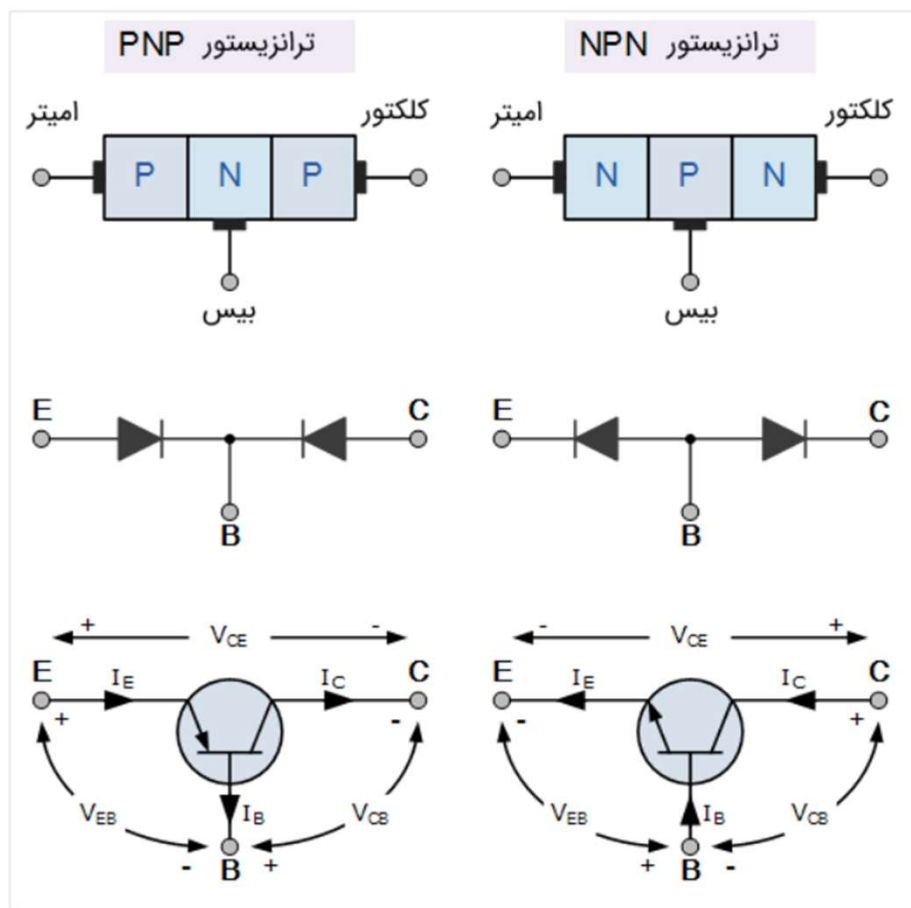
واژه ترانزیستور ترکیب دو بخش ترانس و رزیستور است که حالت عملکرد آن را توصیف می کند که این به اوایل توسعه الکترونیک بر می گردد.

ترانزیستورها قطعات فعال سه سری هستند که از مواد نیمه هادی مختلف ساخته می شوند و می توانند در کاربردهای ولتاژ سیگنال کوچک به عنوان یک عایق یا یک رسانا عمل کنند. توانایی ترانزیستور در تغییر بین این دو حالت سبب می شود این قطعه دو عملکرد اساسی داشته باشد: سوئیچینگ در الکترونیک دیجیتال یا تقویت کنندگی در الکترونیک آنالوگ.

ترانزیستور دو قطبی پیوندی

اگر ما دیود سیگنال را بصورت پشت به پشت به یکدیگر وصل کنیم، این به ما دو اتصال PN - که بصورت سری به یکدیگر وصل شده اند را ارائه می کند، که در این حالت ورودی P یا N مشترکی را به اشتراک می گذارند. همجوشی این دو دیود یک قطعه سه ورودی، دو پیوندی، سه لایه که اساس یک ترانزیستور پیوندی دو قطبی است، را ایجاد می کند.

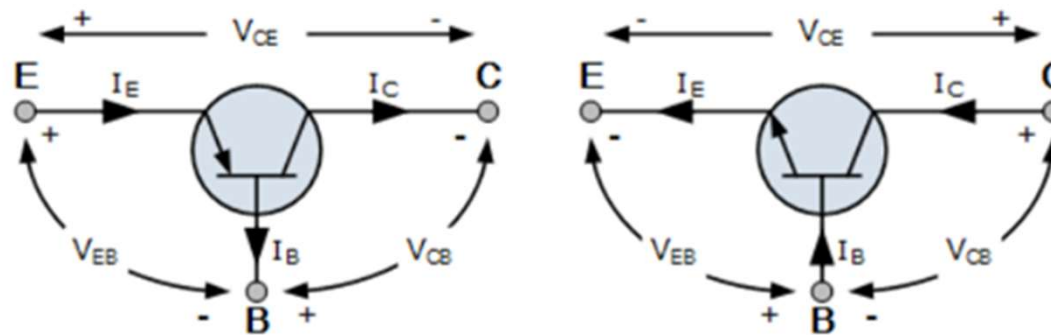
دو نوع پایه از ساختار ترانزیستور دو قطبی وجود دارد PNP و NPN، که اساساً ساختار فیزیکی مواد نیمه رسانای نوع N و نوع P چیزی که از آن ساخته شده‌اند را توصیف می‌کند. ساختار پایه ترانزیستور دوقطبی از دو اتصال PN – که سه ورودی اتصال با نام مشخص برای هر ورودی برای متمایز شدن از یکدیگر دارد، تشکیل شده است. این سه ورودی با عنوان‌های امیتر E، کلکتور C و بیس B نامگذاری شده‌اند.



در هر دو ترانزیستور npn و pnp مجموع جریان های بیس و کلکتور برابر با جریان امیتر است. با این تفاوت که در ترانزیستور pnp جریان از امیتر وارد و از بیس و کلکتور خارج می شود اما در ترانزیستور npn جریان از بیس و کلکتور وارد و از امیتر خارج می شود.

از لحاظ ساختمان ترانزیستور، عرض ناحیه بیس خیلی کم بوده و میزان ناخاصی ناحیه امیتر از بیس بیشتر و بیس نیز از کلکتور بیشتر است.

$$I_E = I_B + I_C$$





حالت های مختلف بایاس ترانزیستور

با توجه به اینکه یک ترانزیستور را می توان مانند دو دیود متصل به هم تصور نمود و نیز با توجه به اینکه هر دو دیود می تواند بایاس مستقیم و بایاس معکوس باشد، در مجموع می توان چهار حالت مختلف کاری را برای ترانزیستور در نظر گرفت:

نامیه کاری	بایاس دیود بیس - امیتر	بایاس دیود کولکتر - میس
فعال ترانزیستور	مستقیم	معکوس
اسباع	مستقیم	مستقیم
قطع و جداسازی	معکوس	معکوس
نسب معکوس سازگار با فرکانس بالا	معکوس	مستقیم

ناحیه قطع Cutoff

در حالت قطع دو پیوند بیس-امیتر و بیس-کلکتور در بایاس معکوس اند و ترانزیستور تقریباً هیچ جریانی عبور نمی‌دهد و مانند یک کلید باز رفتار می‌کند. به اصطلاح ترانزیستور خاموش است و روابط زیر برقرار است.

معادلات:

$$I_B = I_C = I_E = 0$$

$$V_{BE} = V_{BC} = V_{CE} = V_{CC}$$

در این حالت ترانزیستور در ناحیه قطع قرار دارد.

کلکتور خاموش

ناحیه فعال Active

در حالت قطع دو پیوند بیس-امیتر بایاس مستقیم و دیود بیس-کلکتور در بایاس معکوس می باشد. در این حالت جریانی از کلکتور ترانزیستور جاری می شود که β برابر جریان بیس است. β ضریب تقویت کنندگی ترانزیستور نام دارد. در این ناحیه از ترانزیستور به عنوان تقویت کننده استفاده می شود. روابط زیر در این ناحیه معتبر است:

$$I_C = \alpha I_E = \beta I_B$$

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

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}, \quad \beta = \frac{I_C}{I_B}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

که در آن، I_C جریان کلکتور، I_B جریان بیس و I_E جریان امیتر است.

حالت اشباع Saturation

در این ناحیه هر دو پیوند در بایاس مستقیم هستند و ترانزیستور مانند یک کلید بسته عمل می‌کند. این حالت به ازای اعمال ولتاژهای بزرگ به بیس اتفاق می‌افتد. در این حالت رابطه ناحیه فعال دیگر معتبر نیست و به شکل $I_B \gg \frac{I_{C(sat)}}{\beta}$ در می‌آید. هم‌چنین در این ناحیه رابطه

$$V_{CE} = V_{CE(sat)} \cong 0 \text{ or } 0.2$$

برقرار می‌باشد. به عبارتی دیگر، پایه‌های کلکتور و امیتر به هم اتصال کوتاه می‌گردند و ترانزیستور مانند یک کلید روشن عمل می‌کند.

نحوه تحلیل DC مدارهای ترانزیستوری

با توجه به نوع بایاس دیود بیس-امیتر روشن یا خاموش بودن ترانزیستور را تشخیص می دهیم. در صورت روشن بودن ترانزیستور، فرض می کنیم که ترانزیستور در حالت فعال باشد. سپس با استفاده از روابط معتبر در ناحیه فعال محاسبات را انجام داده و فرض انجام شده را چک می کنیم.

در صورت برقرار بودن شرایط فرض ما درست بوده و محاسبات نیز معتبر است و ترانزیستور در ناحیه فعال قرار دارد.

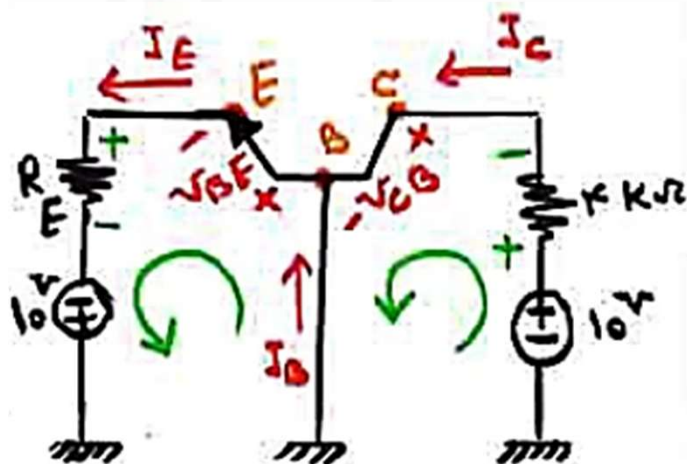
در غیر این صورت فرض فعال بودن اشتباه بوده و ترانزیستور اشباع می باشد و باید با فرض جدید اشباع محاسبات را مجدداً انجام دهیم.

لازم به ذکر است برای چک کردن فرض فعال بودن ترانزیستور می توانیم از معتبر بودن یکی از روابط زیر استفاده کنیم:

دیود بیس-کلکتور بایاس معکوس باشد یا $V_{CE} > V_{CE(sat)}$



مثال: در شکل زیر با فرض فعال بودن ترانزیستور و $\alpha = 0.98$ ، $V_{BE} = 0.7 V$ ، $V_{CB} = 5 V$ ، مقادیر I_E ، I_B ، I_C و R_E را بدست آورید.



پاسخ: گام اول: مشخص کردن جهت جریان بیس، کلکتور و امیتر

گام دوم: KVL زدن در در حلقه سمت راست (حلقه شامل بیس-کلکتور)

$$-10 + 4I_C + V_{CB} = 0 \rightarrow -10 + 4I_C + 5 = 0$$

$$4I_C - 5 = 0 \rightarrow 4I_C = 5 \rightarrow I_C = \frac{5}{4} = 1.25 \text{ mA}$$

با توجه به اینکه در صورت سوال گفته ترانزیستور در ناحیه فعال قرار دارد، بنابراین

از روابط حاکم بر ناحیه فعال استفاده می کنیم و جریان امیتر را بدست می آوریم:

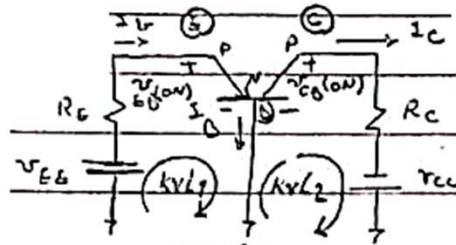
$$I_C = \alpha I_E \rightarrow I_E = \frac{I_C}{\alpha} = \frac{1.25 \text{ mA}}{0.98} = 1.28 \text{ mA} \rightarrow I_E = 1.28 \text{ mA}$$

برای بدست آوردن جریان بیس (I_B) از رابطه زیر استفاده می کنیم:

$$I_E = I_C + I_B \rightarrow I_B = I_E - I_C = 1.28 - 1.25 = 0.03 \text{ mA} \rightarrow I_B = 0.03 \text{ mA}$$

برای بدست آوردن R_E در حلقه سمت چپ KVL می زنیم.

$$V_{BE} + R_E I_E - 10 = 0 \rightarrow 0.7 + R_E \times 1.28 - 10 = 0 \rightarrow 1.28 R_E = 9.3 \rightarrow R_E = \frac{9.3}{1.28} = 7.27 \text{ K}\Omega$$



در مدار سطح زیرین داریم:

$$R_E = 9.3 \text{ k}$$

$$\alpha = 0.98$$

$$V_{CC} = V_{EE} = 10 \text{ V}$$

الف) فرض $R_E = 11 \text{ k}$ و $V_{E1(ON)} = 0.7 \text{ V}$ $V_{E2(ON)} = 0.7 \text{ V}$ $V_{E1(ON)} = 0.7 \text{ V}$ $V_{E2(ON)} = 0.7 \text{ V}$

ب) $R_E = 4 \text{ k}$ $V_{E1} = 0 \text{ V}$ $V_{E2} = 0 \text{ V}$

الف) $V_{E1} = 0 \text{ V}$ $V_{E2} = 0 \text{ V}$ $V_{E1} = 0 \text{ V}$ $V_{E2} = 0 \text{ V}$

ب) $V_{E1} = 0 \text{ V}$ $V_{E2} = 0 \text{ V}$ $V_{E1} = 0 \text{ V}$ $V_{E2} = 0 \text{ V}$

$$V_{E1} = V_{EE} + R_E I_E + V_{E1(ON)} = 0 \Rightarrow I_E = \frac{V_{EE} - V_{E1(ON)}}{R_E}$$

$$I_E = \frac{10 - 0.7}{9.3} = 1 \text{ mA}$$

$$I_C = \alpha I_E = 0.98 \times 1 = 0.98 \text{ mA}$$

$$V_{E1} = V_{EE} + (R_E I_E) + V_{E1(ON)} + V_{E2(ON)} + R_E I_C - V_{CC} = 0$$

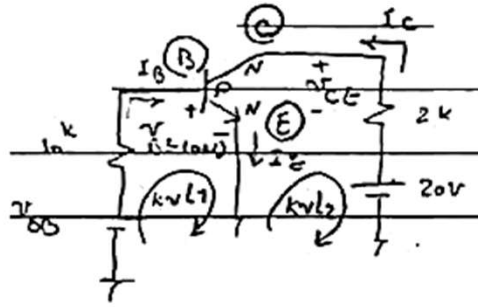
$$V_{E1} = 10 + (9.3 \times 1) + 0.7 + 0.7 + 9.3 \times 0.98 - 10 = 0$$

$$V_{E1(ON)} = 0.78 \text{ V} \Rightarrow V_{E1} = 0.78 \text{ V} \Rightarrow V_{E1} = 0.78 \text{ V}$$

$$V_{E1(ON)} = 0.78 \text{ V} \Rightarrow V_{E1} = 0.78 \text{ V} \Rightarrow V_{E1} = 0.78 \text{ V}$$

ب) $V_{E1} = 0 \text{ V}$ $V_{E2} = 0 \text{ V}$ $V_{E1} = 0 \text{ V}$ $V_{E2} = 0 \text{ V}$

ب) $V_{E1} = 0 \text{ V}$ $V_{E2} = 0 \text{ V}$ $V_{E1} = 0 \text{ V}$ $V_{E2} = 0 \text{ V}$



مسئله:

بافتراض $\beta = 100$ و $V_{BE(ON)} = 0.7V$ و $V_{BE(sat)} = 0.2V$

برای بیس آمپر؟ (الف) $V_{BB} = 1.2V$ ، I_C و $V_{CE} = ?$

(ب) $V_{BB} = 2.7V$ و I_C ، $V_{CE} = ?$

محل اتصال ترانزیستور را مشخص کنید و بیس آمپر را مشخص کنید.

(الف) با توجه به ولتاژ $V_{BB} = 1.2V$ و فرض اینکه ترانزیستور در ناحیه فعال قرار دارد، بیس آمپر را مشخص کنید.

برای حل مسئله:

$$KVL1: -V_{BB} + 10k I_B + V_{BE(ON)} = 0 \quad \Rightarrow \quad I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE(ON)}}{10k} = \frac{1.2 - 0.7}{10k} = 0.05mA$$

$$I_B = 50\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 5mA \quad \text{و} \quad KVL2: -V_{CE} - 2k I_C + 20 = 0$$

$$V_{CE} = -2k \times 5mA + 20 = 10V \quad \text{و} \quad V_{CE} = 10V > V_{CE(sat)} = 0.2V$$

بنابراین ترانزیستور در ناحیه فعال قرار دارد و بیس آمپر را مشخص کردیم.

حالا بیس آمپر را مشخص کردیم و $V_{CE} = 10V$ و $I_C = 5mA$ و $V_{BE} = 0.7V$ و $V_{CE(sat)} = 0.2V$

و حالا ترانزیستور را مشخص کردیم.

برای بدست آوردن V_{CE} و I_C باید معادله V_{CE} را بر حسب I_C بنویسیم و معادله I_C را بر حسب V_{CE} بنویسیم و آن دو معادله را با هم حل کنیم.

 معادله V_{CE} را بر حسب I_C بنویسیم:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_{C2} = 20 - I_C \times 20k$$

معادله I_C را بر حسب V_{CE} بنویسیم:

$$I_C = \beta I_B = \beta \frac{V_{CE} - V_{BE}}{R_{B1} + R_{B2}} = \beta \frac{V_{CE} - 0.7}{10k + 20k}$$

حالا این دو معادله را با هم حل می‌کنیم.

$$V_{CE} = 20 - 20k \times \beta \frac{V_{CE} - 0.7}{30k}$$

پس:

$$V_{CE} = 20 - 0.2(V_{CE} - 0.7)$$

پس:

$$V_{CE} = 19.8V$$

حالا I_C را می‌توانیم پیدا کنیم:

$$I_C = \beta \frac{V_{CE} - 0.7}{30k} = 20 \times \frac{19.8 - 0.7}{30k} = 1.27mA$$

حالا V_{CE} و I_C را داریم:

$$V_{CE} = 19.8V$$

$$I_C = 1.27mA$$

حالا I_B را می‌توانیم پیدا کنیم:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1.27mA}{20} = 0.0635mA$$

حالا V_{BE} را می‌توانیم پیدا کنیم:

$$V_{BE} = 0.7V$$

حالا می‌توانیم پاسخ نهایی را بنویسیم:

$$V_{CE} = 19.8V$$

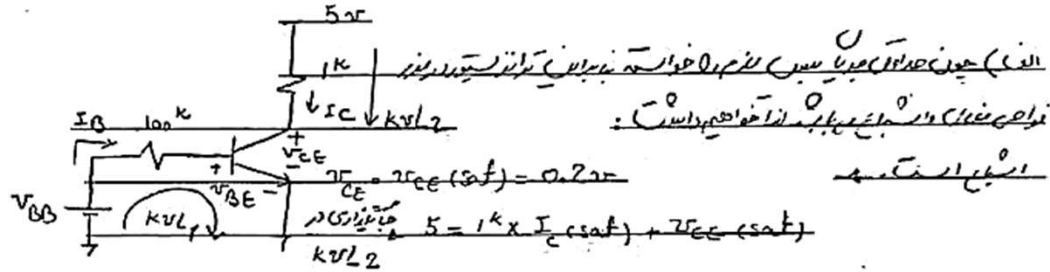
$$I_C = 1.27mA$$

$$I_B = 0.0635mA$$

$$V_{BE} = 0.7V$$



شکل ۱: مدار یک ترانزیستور BJT در حالت سaturaion. پارامترها: $\beta = 100$, $r_{CE}(sat) = 0.2 \Omega$.
 مقادیر داده شده: $I_{CBO} = 0.1 \mu A$, $v_{CE}(cut) = -0.7 V$ و $v_{BE}(cut) = 0.7 V$.
 الف) محاسبه جریان I_C و I_B و ولتاژ v_{CE} و v_{BE} در حالت سaturaion.
 ب) محاسبه ولتاژ v_{BB} و v_{BB} برای ترانزیستور در حالت سaturaion.



$$I_C(sat) = \frac{5 - 0.2}{1k} = 4.8 \text{ mA}$$

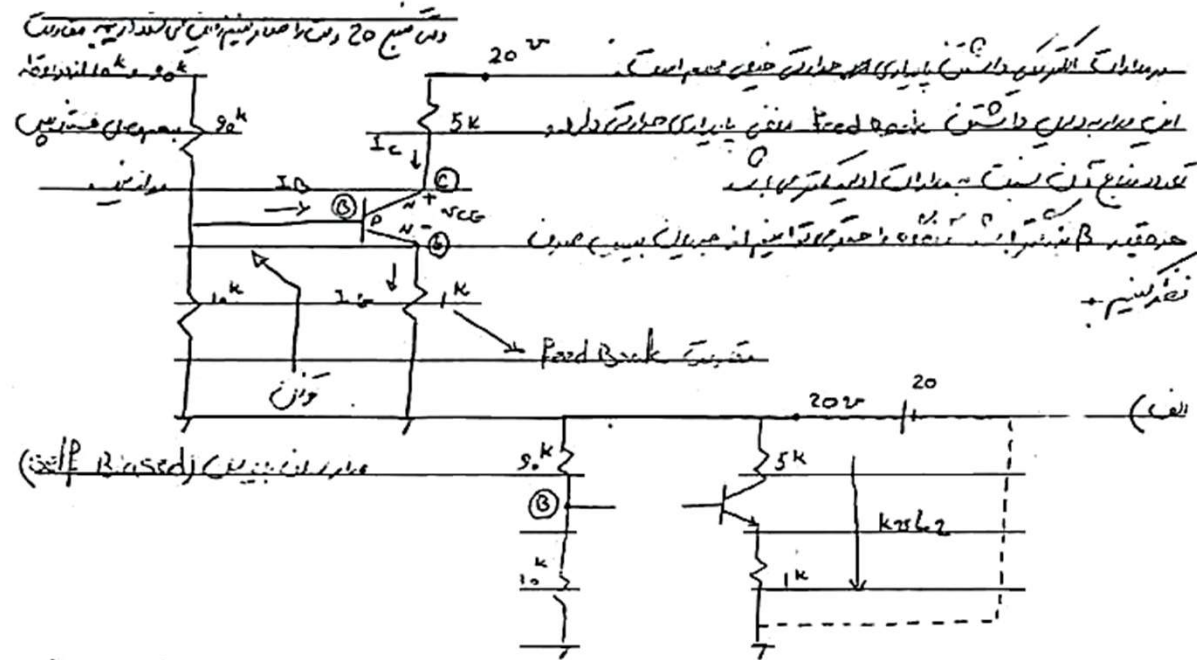
$$I_B(sat) = \frac{I_C(sat)}{\beta} = \frac{4.8 \text{ mA}}{100} = 0.048 \text{ mA}$$

$$v_{BB} = 100k \cdot I_B(sat) + v_{BE}(sat) = 100k \cdot 0.048 \text{ mA} + 0.7 V = 4.8 V + 0.7 V = 5.5 V$$

$$\begin{aligned} v_{BE} &= v_{BE}(sat) = 0.7 V \\ I_C &= I_E = I_{CBO} = 0.1 \mu A \\ v_{BB} &= 100k \cdot I_B + v_{BE} = 100k \cdot 0.048 \text{ mA} + 0.7 V = 5.5 V \end{aligned}$$

$$v_{BB} = 5.5 V$$

[illegible]



$$r_0 = \frac{20 \times 10}{90 + 10} = 2 \text{ m}$$

$$V_E = 2 - 0.7 - 1.3V = I_E = I_C = \frac{1.3V}{1k} = 1.3mA$$

$$x_{0.75(100)} = 0.75$$

نقد $I_E = I_C$ چون که در حالتی که در این شکل دیده می شود.

$$k_{v12}: 20 = 5^k v_{ce} + v_{ce} + 1^k v_{ce} + \dots + v_{ce} = 20 - 6^k \times 1.3^{11} = 12.2 \text{ V}$$

$v = 12.2$ قرآن مجید

آشنائی با MOSFET ها

MOSFET ها دو نوع N کانال و P کانال دارند و در هر دو نوع آنها فقط یک حامل جریان وجود دارد (الکترون یا حفره) و به این لحاظ به آنها ترانزیستورهای تک قطبی گویند (برخلاف BJT که ترانزیستور دو قطبی است). MOSFET ها در مقایسه BJT خیلی ساده تر و کوچکتر ساخته می شوند و در توابع منطقی و حافظه ها، که نیازی به استفاده از مقاومت و دیود نباشد صرفاً با MOSFET ها ساخته می شوند. بنابراین در ساخت آی سی های VLSI نیز صرفاً از تکنولوژی MOS استفاده می شود. علاوه بر آن تکنولوژی MOS در ساخت آی سی ها آنالوگ نیز کاربرد گسترده ای دارند.

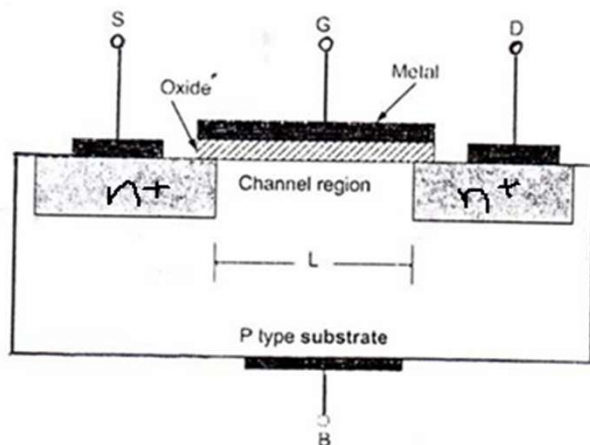
این ترانزیستورها به دودسته افزایشی و یا تخلیه ای تقسیم می شوند. در ترانزیستورهای افزایشی کانال از ابتدا وجود نداشته و با اعمال ولتاژ به گیت ایجاد می شود. در حالی که در ترانزیستورهای تخلیه ای کانال از ابتدا در ترانزیستور وجود دارد. ترانزیستور MOSFET در دو شکل PMOS (کانال از نوع p یا حفره ای) و NMOS (کانال از نوع n یا الکترونی) ساخته می شوند.

هر ترانزیستور دارای ۴ پایه می باشد که عبارتند از:
گیت (Gate) ، درین (Drain) و سورس (Source)

با توجه به نحوه بایاس شدن این پایه ها، ترانزیستور می تواند قطع (خاموش)، در ناحیه اشباع و یا در ناحیه خطی (تریودی) رفتار کند. در صورتی که بخواهیم از ترانزیستور به عنوان تقویت کننده استفاده کنیم ترانزیستور باید در ناحیه اشباع فعالیت کند.

ساختمان و عملکرد MOSFET افزایشی:

ساختمان MOSFET افزایشی کانال N در شکل نشان داده شده است. این ترانزیستور روی زیر لایه نوع P (P-Substrate) ساخته می شود. این زیر لایه بدنه نیز نامیده می شود. دو ناحیه نوع N با ناخالصی زیاد در داخل زیر لایه ایجاد می شود (n^+) و یک لایه نازک (حدود 0.1 میکرون) از دی اکسید سیلیسیم (SiO_2)، که عایق بسیار خوبی است، روی سطح زیر لایه رشد داده می شود و سطح بین دو ناحیه سورس (Source) و درین (Drain) را می پوشاند، که روی اکسید فلز نشاند می شود. این عنصر چهار پایانه (ترمینال) دارد: گیت (G)، سورس (S)، درین (D) و زیر لایه یا بدنه (B).



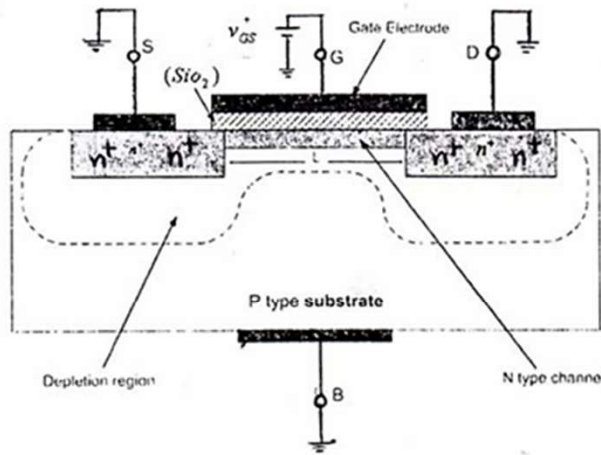
ساختمان یک ترانزیستور NMOS افزایشی

نشان داده خواهد شد که ولتاژ گیت جریان بین سورس و درین را کنترل می کند. جریان بین سورس و درین در ناحیه ای بنام کانال جاری می شود. طول این کانال یعنی L در بازه 1 تا 10 میکرومتر و عرض کانال یعنی W در بازه 2 تا 500 میکرومتر ساخته می شود. MOSFET برخلاف BJT عنصری متقارن است و جای S و D را در مدارها می توان با هم عوض کرد.

ایجاد کانال برای عبور جریان:

ولتاژ مثبت گیت سبب می شود تعدادی الکترون جذب زیر لایه پائین گیت شده، حفره ها را به سمت پائین رانده و بار منفی ساکن ایجاد نمایند.

در سطح زیر لایه و زیر ناحیه گیت یک کانال نوع N ایجاد می شود. ولتاژ مثبت گیت الکترونها را از درین و سورس به این ناحیه زیر گیت کشانده و باعث ایجاد یک کانال N می شود، که نواحی سورس و درین را به هم وصل می کند.

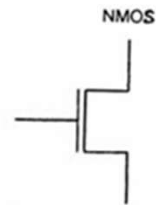
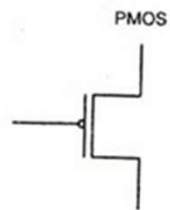


MOSFET ساخته شده، که در شکل نشان داده شده است، از نوع کانال N است و به آن NMOS گویند. اگر ولتاژی بین سورس و درین اعمال شود، الکترونها آزاد جریانی در این کانال ایجاد می کنند. توجه کنید که NMOS در زیر لایه نوع P به وجود می آید و به همین خاطر این کانال القائی لایه وارون شده (Inversion Layer) نامیده می شود. حداقل ولتاژ V_{GS} لازم برای انباشتن تعداد کافی الکترون در کانال، ولتاژ آستانه نام دارد و با V_t نشان داده می شود و برای NMOS های مختلف معمولاً بین ۱ تا ۳ ولت است.

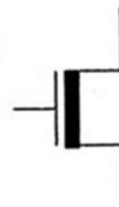
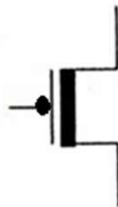
گیت و بدنه MOSFET یک خازن می سازند که لایه اکسید دی الکتریک آن است. بار مثبت روی الکتروود گیت و بار منفی در صفحه پائینی با الکترونها موجود در کانال القائی شکل می گیرد. در نتیجه یک میدان الکتریکی در جهت عمودی به وجود می آید. این میدان، مقدار بار کانال، رسانائی کانال و در نتیجه جریان گذرنده از کانال هنگام اعمال ولتاژ V_{DS} را کنترل می کند.

نمادهای مداری ترانزیستورهای افزایشی و تخلیه ای

نماد ترانزیستورهای MOSFET افزایشی



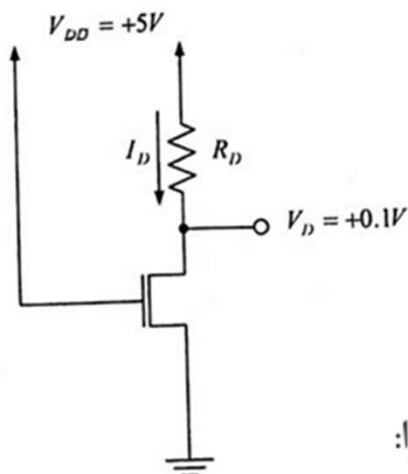
نماد مداری MOSFET کاهششی



خلاصه مشخصه های ترانزیستورهای MOSFET

P - کانال		N - کانال		نوع کانال
MOS تخلیه ای	MOS افزایشی	MOS تخلیه ای	MOS افزایشی	MOS نوع پارامترها
+	-	-	+	V_t
$\mu_p C_{ox}(W/L)$		$\mu_n C_{ox}(W/L)$		K
$V_{GS} < V_t$		$V_{GS} > V_t$		برای وصل کردن ترانزیستور
-		+		V_{DS}
$V_{DS} \geq V_{GS} - V_t$		$V_{DS} \leq V_{GS} - V_t$		برای کار در ناحیه قبل از اشباع
$V_{DS} \leq V_{GS} - V_t$		$V_{DS} \geq V_{GS} - V_t$		برای کار در ناحیه اشباع
$I_D = K \left[(V_{GS} - V_t)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$				در ناحیه قبل از اشباع
$I_D = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{DS})$				در ناحیه اشباع

مثال برای مدار شکل زیر در صورتی که $V_t = 1\text{ V}$ و $K_n = 0.5\text{ mA/V}$ باشد، مقاومت بین درین و سورس را حساب کنید.

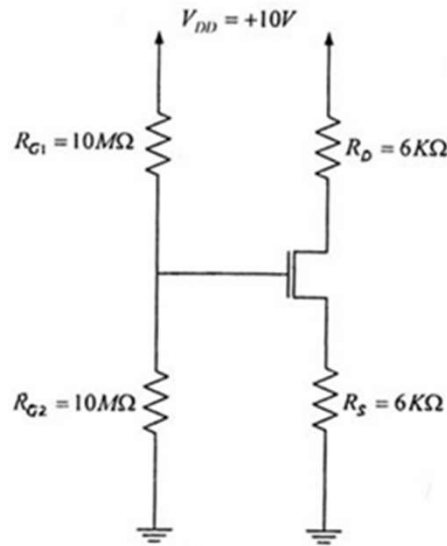


حل مثال با $V_{DS} = 0.1\text{ V}$ و $V_{GS} = 5\text{ V}$ و $V_t = 1\text{ V}$ نامساوی $V_{DS} < V_{GS} - V_t$ برقرار است زیرا: $0.1 < 5 - 1 = 4$. بنابراین ترانزیستور در ناحیه خطی کار می کند و جریان I_D از رابطه زیر به دست می آید:

$$I_D = K_n \left[(V_{GS} - V_t)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] = 1 \left[(5 - 1) \times 0.1 - \frac{0.1^2}{2} \right] = 0.395\text{ mA}$$

$$r_{ds} = \frac{V_{DS}}{I_D} = \frac{0.1\text{ V}}{0.395\text{ mA}} = 235\Omega$$

مثال ترانزیستور مدار شکل زیر در چه ناحیه ای کار می کند؟ فرض کنید $V_t = 1V$ و $K_n = 0.5$ باشد.



حل: چون جریان گیت صفر است، جریان مقاومت‌های R_{G1} و R_{G2} با یکدیگر برابرند و این دو مقاومت با یکدیگر به صورت سری قرار گرفته اند و داریم:

$$V_G = 10 \times \frac{10}{10+10} = 5V$$

با وجود این ولتاژ مثبت گیت ترانزیستور NMOS وصل است و یا در ناحیه اشباع یا در ناحیه خطی کار می کند. فرض می کنیم ترانزیستور در ناحیه اشباع کار می کند و درستی فرض خود را امتحان می کنیم. اگر این فرض درست نبود بار دیگر مسأله را برای کار ترانزیستور در ناحیه خطی حل می کنیم.

$$V_G = 5V, V_S = I_D \times 6 = 6I_D, V_{GS} = 5 - 6I_D$$

$$I_D = \frac{K_n}{2} (V_{GS} - V_t)^2 = 0.5(5 - 6I_D - 1)^2$$

بنابراین معادله زیر برای I_D برقرار است:

$$18I_D^2 - 25I_D + 8 = 0 \Rightarrow I_D = 0.5mA, 0.89mA$$

اگر $I_D = 0.89mA$ باشد، $V_S = 6 \times 0.89 = 5.34V$ می شود، که بیش از ولتاژ گیت است و به صورت فیزیکی امکان پذیر نیست. بنابراین $I_D = 0.5mA$ قابل قبول است:

$$I_D = 0.5mA \Rightarrow V_S = 6 \times 0.5 = 3V \Rightarrow V_{GS} = 5 - 3 = 2V$$

$$V_D = 10 - 6I_D = 10 - 6 \times 0.5 = 7V$$

$$V_{GS} - V_t = 2 - 1 = 1V, V_{DS} = 7 - 3 = 4V$$

چون نامساوی $V_{DS} > (V_{GS} - V_t)$ برقرار است، بنابراین فرض اینکه ترانزیستور در ناحیه اشباع کار می کند درست بوده است.