



دانشکده برق و کامپیوتر

به نام خدا

مبانی مدارهای الکتریکی و الکترونیکی

فصل چهارم: نیمه هادیها و دیود

ارائه کننده:

روحانی

آذر ۱۴۰۲

نیمه هادیها و دیود نیمه هادیها

مقدمه‌ای بر فیزیک الکترونیک

همان‌گونه که عنوان فصل نشان می‌دهد، قصد این نیست که به بحث پیرامون مطالب نظری عمیق در زمینه ساختمان اتمی و بلوری اجسام پردازیم؛ بلکه منظور نگاهی گذرا به ساختمان بلوری نیمه‌هادیها و عمدتاً آشنایی با چگونگی جایه‌جایی بارهای الکتریکی در این اجسام و تفاوت آنها با فلزات است. همین آشنایی مختصر می‌تواند به درک بیشتر و بهتر مفاهیمی که در فصل‌های بعد مورد مطالعه قرار می‌گیرند، کمک کند. بررسی دقیق‌تر بسیاری از مطالبی که در این فصل به گونه‌ای توصیفی به شرح آنها می‌پردازیم در کتابهای فیزیک الکترونیک آمده است.

۱- تقسیم‌بندی اجسام از نظر هدایت الکتریکی

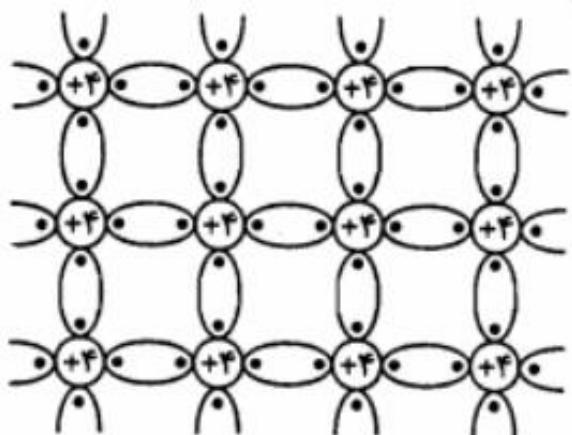
از نقطه نظر قابلیت هدایت الکتریکی، اجسام را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود: هادی نیمه‌هادی و عایق. هادیها عناصر و ترکیباتی هستند که جریان الکتریکی را به خوبی از خود عبور می‌دهند. از بهترین هادیهای متداول، نقره، مس و آلومینیوم را می‌توان نام برد. در نیمه‌هادیها، هدایت الکتریکی کمتر از هادیها بوده ولی قابل کنترل است. عایقها اجسامی هستند که در میدانهای الکتریکی معمولی جریان الکتریکی را هدایت نمی‌کنند و فقط ممکن است در میدانهای خیلی زیاد جریان از آنها عبور کند. از نقطه نظر کاربرد در مهندسی برق، موادی که مقاومت ویژه آنها کمتر از $10^{-2} \Omega - cm$ باشد به عنوان هادی و موادی که دارای مقاومت ویژه بیشتر از $10^5 \Omega - cm$ باشند عایق محسوب می‌شوند. مقاومت ویژه نیمه‌هادیها در محدوده بین دو مقدار مذکور قرار دارد.

نیمه هادیها و دیود

تعریف نیمه هادیها

نیمه هادیها گروهی از مواد هستند که از نظر توانایی هدایت الکتریکی، بین هادی و عایق قرار دارند. موضوع غالب توجه در مورد نیمه هادیها این است که هدایت الکتریکی آنها تحت تأثیر عواملی چون تحريك نوری، افزایش دما و تغيير ميزان ناخالصی به نحو قابل ملاحظه ای تغيير می یابد. اين خاصیت مهم مبنای کار بسیاری از قطعه های نیمه هادی است که در الکترونیک مورد استفاده قرار می گيرند.

هدایت الکتریکی در نیمه هادیها توسط دو نوع حامل بار الکتریکی یعنی الکترونهای آزاد و حفره ها صورت می گیرد. در اين مواد الکترونهای ظرفیت نمی توانند آزادانه به هر سو حرکت نمایند، بلکه در پیوندهای کرووالان بین اتمها محصورند. مهمترین نیمه هادیها در الکترونیک سیلیکن (Si) و ژرمانیم (Ge) هستند. اين دو عنصر، علیرغم داشتن چهار الکترون ظرفیت، در دمای معمولی از هدایت الکتریکی خوبی برخوردار نیستند. در دمای صفر مطلق بلورهای سیلیکن و ژرمانیم همانند عایق عمل می کنند (زیرا چهار الکترون ظرفیت هر اتم در پیوندهای کرووالان چهار اتم مجاور خود قرار گرفته اند و نمی توانند همانند الکترونهای ظرفیت در فلزات آزادانه به هر سو حرکت نمایند). در شکل ۲-۱ ساختمان شبکه بلوری سیلیکن نمایش داده شده است.

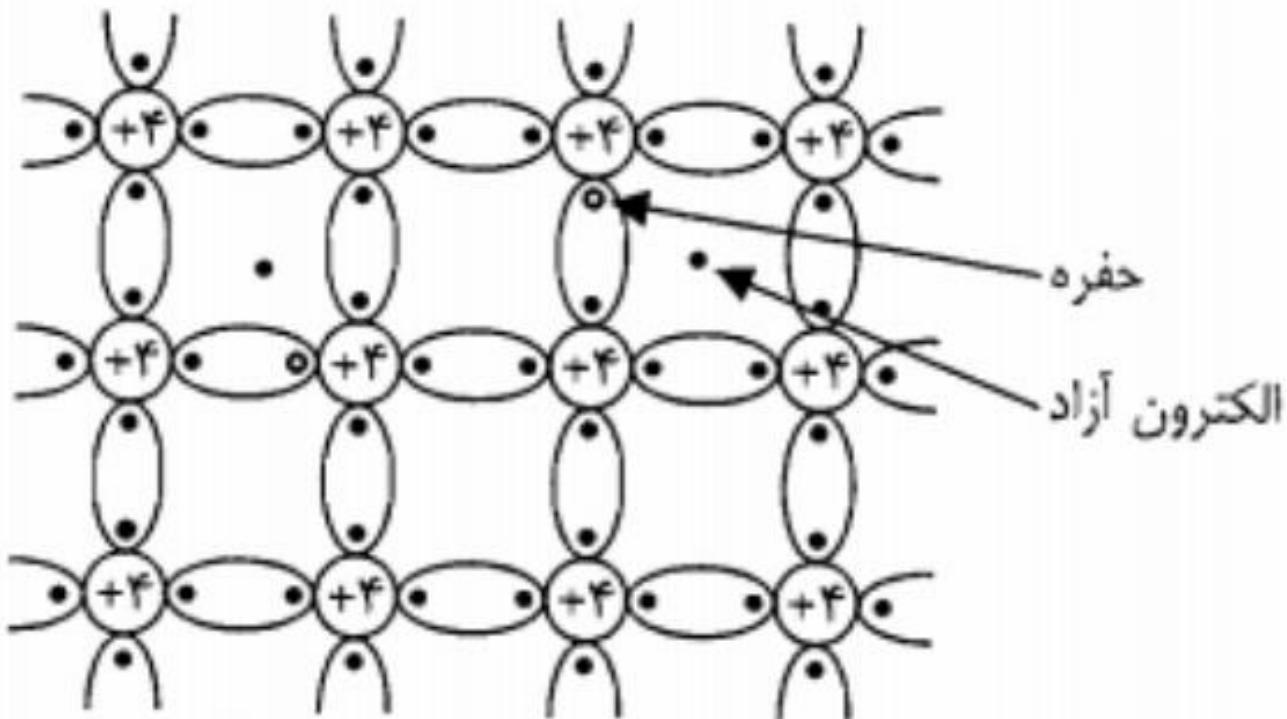


شکل ۲-۱: تمايش دو بعدی ساختمان شبکه بلوری سیلیکن

نیمه هادیها و دیود تغیریف حفره ها

همان طور که قبلاً یادآور شدیم در نیمه هادیها نه تنها الکترونهای آزاد، بلکه حفره ها نیز به صورت حاملهای بار الکتریکی در هدایت جریان دخالت می نمایند. هر حفره - که عملأ جای خالی یک بار منفی است - در واقع نمایانگر یک بار مثبت است. برای روشنتر شدن این موضوع یادآور می شویم که هر اتم سیلیکن که در شکلهای ۲-۱ و ۳-۱ به صورت یک یون با چهار بار مثبت و چهار الکترون در اطراف آن نشان داده شده است، از نظر بار الکتریکی خنثی است. بنابراین وقتی یک پیوند شکسته و یک الکترون آزاد می شود، مجموعه باقیمانده که شامل یک حفره است عملأ دارای بار مثبت خواهد بود. اما تنها دارا بودن بار مثبت برای شرکت حفره ها در جریان الکتریکی کافی نیست، بلکه جایه جایی این حاملهای بار مثبت است که مؤلفه ای از جریان الکتریکی را به وجود می آورد. آیا اتم شامل حفره به جا مانده پس از جدا شدن یک الکترون آزاد می تواند تحت تأثیر میدان الکتریکی حرکت کند؟ یقیناً جواب این سؤال منفی است. زیرا اگر اتمهای بلور به هر دلیل جایه جا شوند ساختمان بلوری به هم ریخته و نیمه هادی ممکن است بسیاری از خواص خود را از دست بدهد. البته چنین حالتی نمی تواند با اعمال شدت میدانهای معمولی رخ دهد. (در واقع نحوه حرکت حفره ها و شرکت آنها در جریان الکتریکی در نیمه هادی به این صورت است که وقتی با رها شدن یک الکترون آزاد از یک پیوند کووالان یک حفره بر جای ماند، یک الکترون ظرفیت از یک پیوند مجاور می تواند به آسانی پیوند خود را شکسته و حفره قبلی را پر نماید. با این کار حفره جدیدی به وجود می آید که محل آن با محل حفره قبلی متفاوت است. به عبارت دیگر یک جایه جایه، حفره صورت گرفته است که جهت آن در خلاف جهت انتقال الکترون بوده است) در

نیمه هادیها و دیود تحریف حفره ها



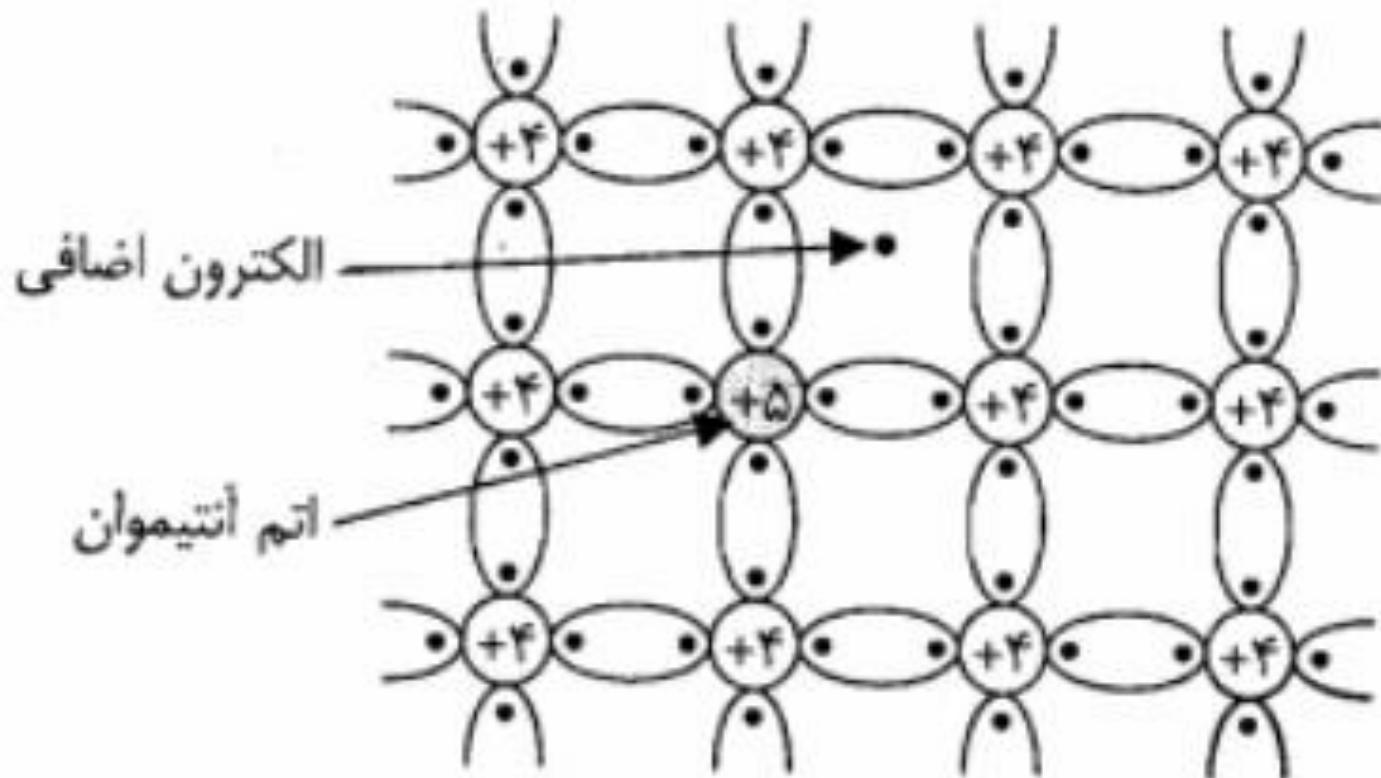
شکل ۱-۳: نحوه ایجاد حفره در یک پیوند کووالان اتمهای بلور سیلیکن

نیمه هادیها و دیود ناخالصی در نیمه هادیها

برای بالا بردن چگالی حاملهای آزاد در نیمه هادیها، می توان با تزریق درصد ناچیزی از یک عنصر سه یا پنج ظرفیتی به بلور، آن را تغليظ نمود. خواهیم دید که تزریق عناصر پنج ظرفیتی از قبیل آنتیموان (Sb)، فسفر (P) و آرسنیک (As) باعث افزایش چگالی الکترونهای آزاد در بلور خواهد شد. بدین لحاظ به ناخالصیهای پنج ظرفیتی ناخالصی نوع N یا ناخالصی بخشندۀ گویند. از طرف دیگر افزایش عناصر سه ظرفیتی، موجب بالا رفتن چگالی حاملهای مثبت یا حفره‌ها در بلور می شود. ناخالصیهای سه ظرفیتی را ناخالصی نوع P یا ناخالصی پذیرنده می نامند. از جمله ناخالصیهای نوع P می توان عناصر سه ظرفیتی ایندیم (In)، گالیم (Ga) و بور (B) را نام برد.

اتمهای ناخالصی سه ظرفیتی در آخرین نوار ظرفیت خود تنها سه الکترون دارند. بنابراین چنانچه این اتمها به سیلیکن یا ژرماتیم تزریق شوند، هر اتم ناخالصی با سه الکtron ظرفیت خود، تنها سه پیوند کووالان از چهار پیوند اتمهای اطراف خود را تکمیل نموده و در پیوند چهارم جای یک الکترون باقی می ماند. این جای خالی در واقع یک حفره جدید است که در بلور به وجود آمده است. در شکل ۱-۶ شبکه بلور سیلیکن با یک اتم ایندیم نشان داده شده است.

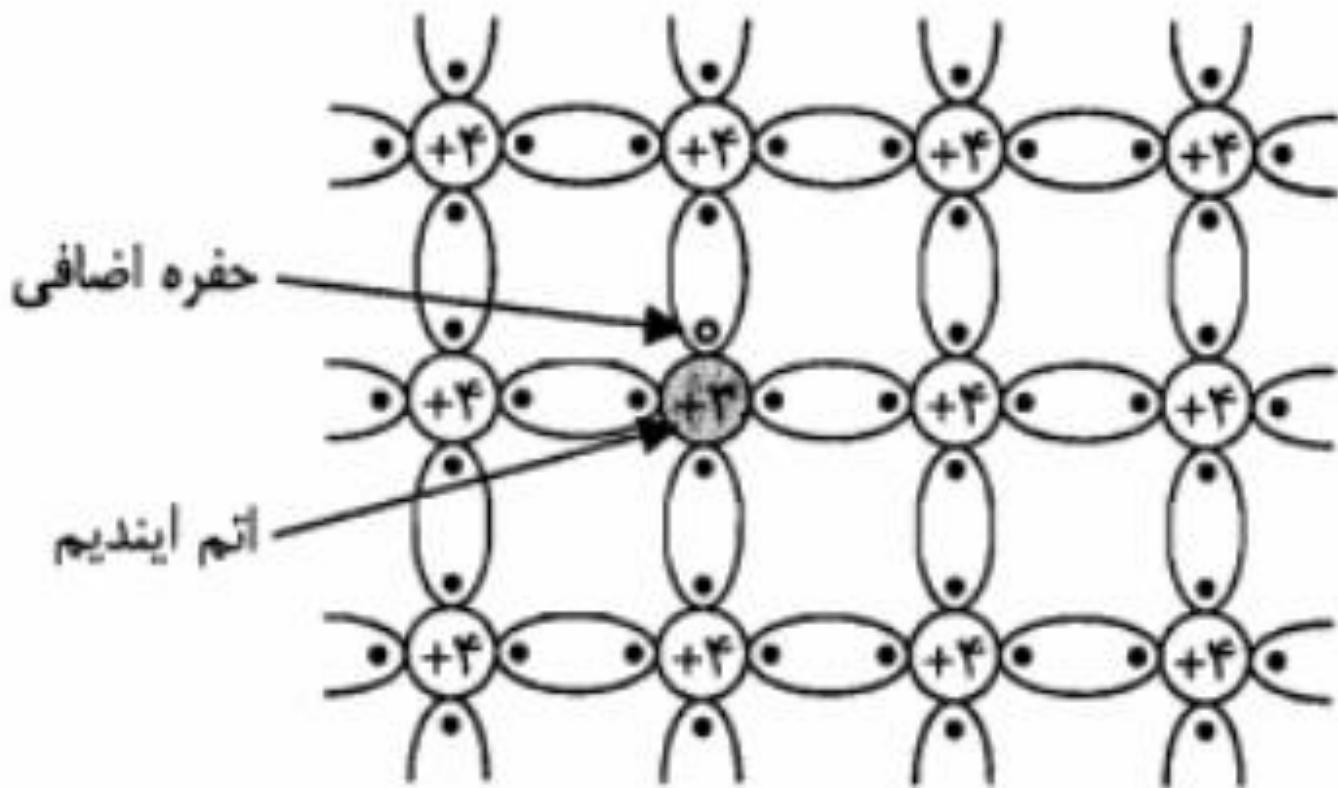
نیمه هادیها و دیود نیمه هادی نوع n



نیمه هادیها و دیود

نیمه هادی نوع p

بلور نیمه هادی شامل اتمهای ناخالصی سه ظرفیتی را نیمه هادی نوع P گویند. با توجه به بحث فوق در نیمه هادی نوع P، در دمای معمولی، حفره ها در پیوندهای مربوط به اتمهای خود نیمه هادی و نه در پیوندهای مربوط به اتمهای ناخالصی - قرار دارند.



نیمه هادیها و دیود

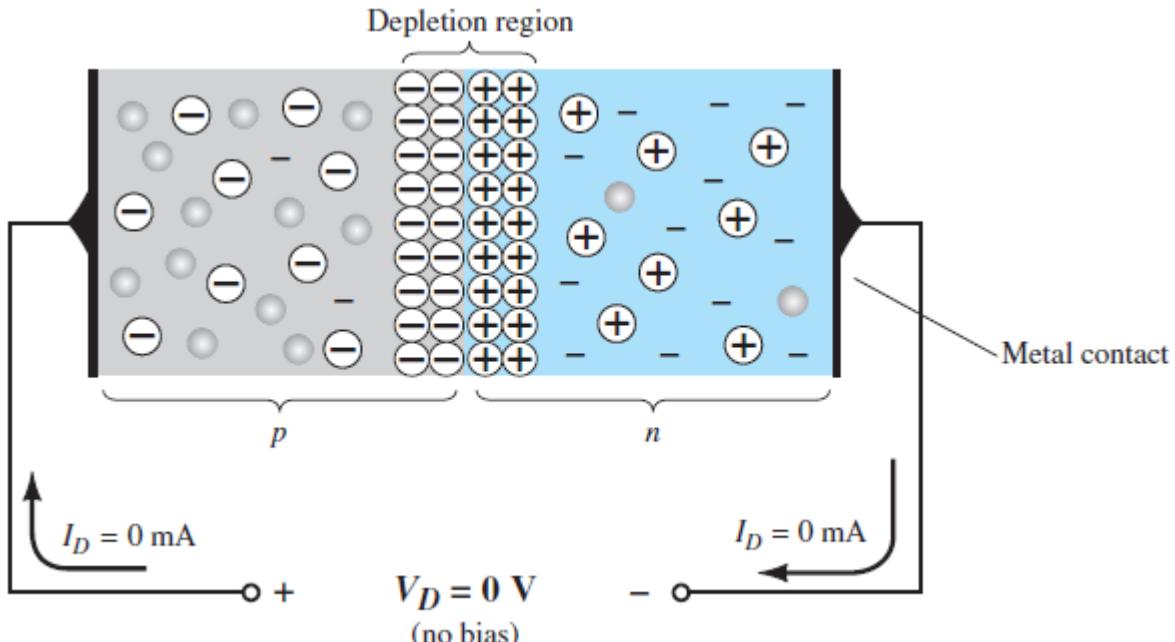
پیوند p-n

یک پیوند $p-N$ از کنار هم قرار گرفتن نیمه هادیهای نوع P و N به وجود می‌آید. البته چنین پیوندی را نمی‌توان از به هم چسباندن دو قطعه بلور به دست آورد، بلکه در ناحیه پیوند، ساختمان بلور باید پیوستگی خود را حفظ کرده باشد. برای آشنایی با نحوه شکل گرفتن یک پیوند $p-N$ به بحث کوتاهی در این زمینه می‌پردازیم.

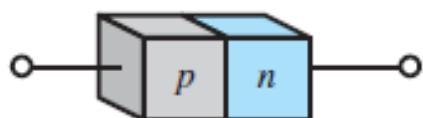
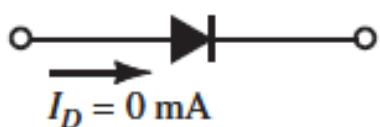
در یک پیوند $p-N$ ، با توجه به اینکه در ناحیه N چگالی الکترونهای آزاد به مراتب بیشتر از ناحیه P می‌باشد و همین طور در ناحیه P چگالی حفره‌ها نسبت به ناحیه N بسیار بیشتر است، در ناحیه مرزی گرادیان چگالی حاملها بسیار بزرگ است. این اختلاف چگالی همان‌طور که در بخش جریان انتشاری توضیح دادیم باعث انتشار حفره‌ها از ناحیه P به طرف ناحیه N و نیز انتشار الکترونهای آزاد از ناحیه N به طرف ناحیه P می‌شود.

جریان نفوذی الکترونهای آزاد از ناحیه N به ناحیه P باعث خنثی شدن حفره‌های این ناحیه در نزدیکی پیوند می‌شود. از طرف دیگر حفره‌ها از ناحیه P به ناحیه N نفوذ کرده و با الکترونهای آزاد ناحیه N در حوالی پیوند ترکیب می‌شوند. بدین ترتیب ناحیه‌ای به عرض W در اطراف پیوند از حاملهای بار الکتریکی آزاد تخلیه می‌شود. این ناحیه را ناحیه تهی یا ناحیه انتقال گویند.

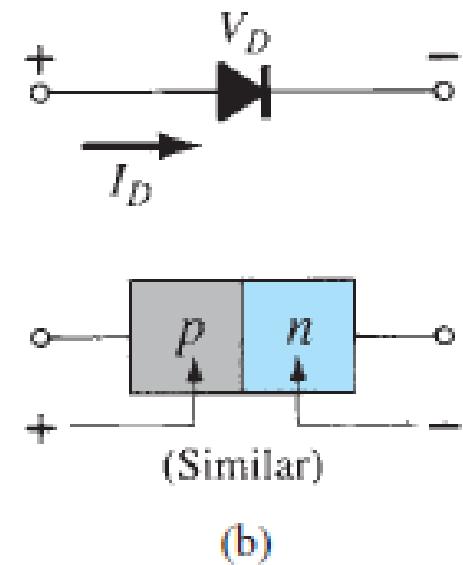
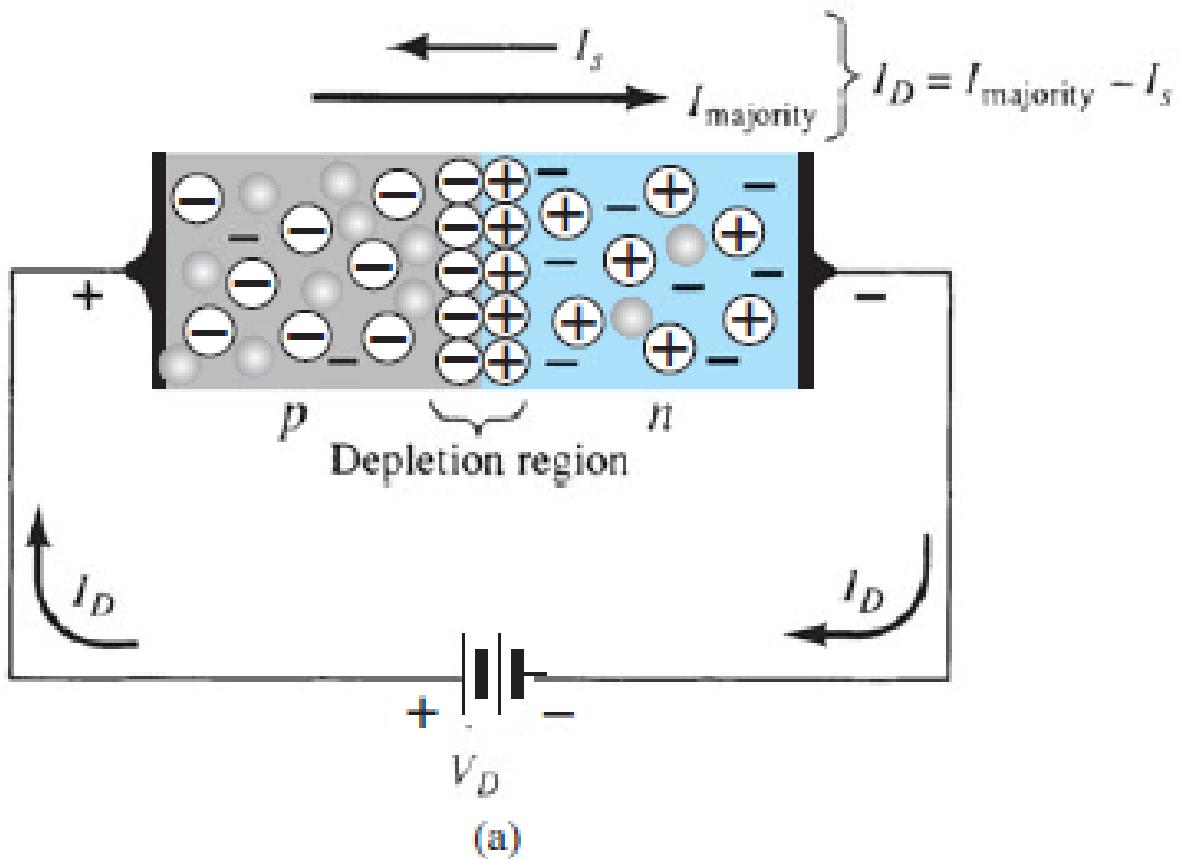
نیمه هادیها و دیود تعریف دیود و انواع باپاس (مستقیم و معکوس):



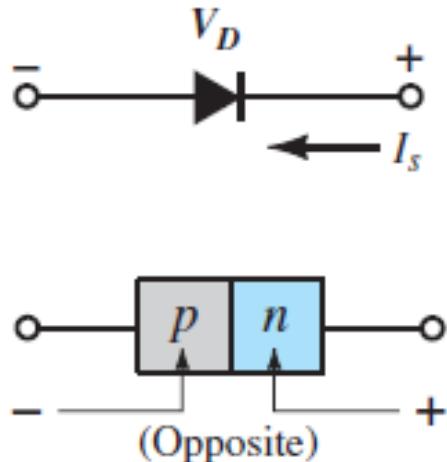
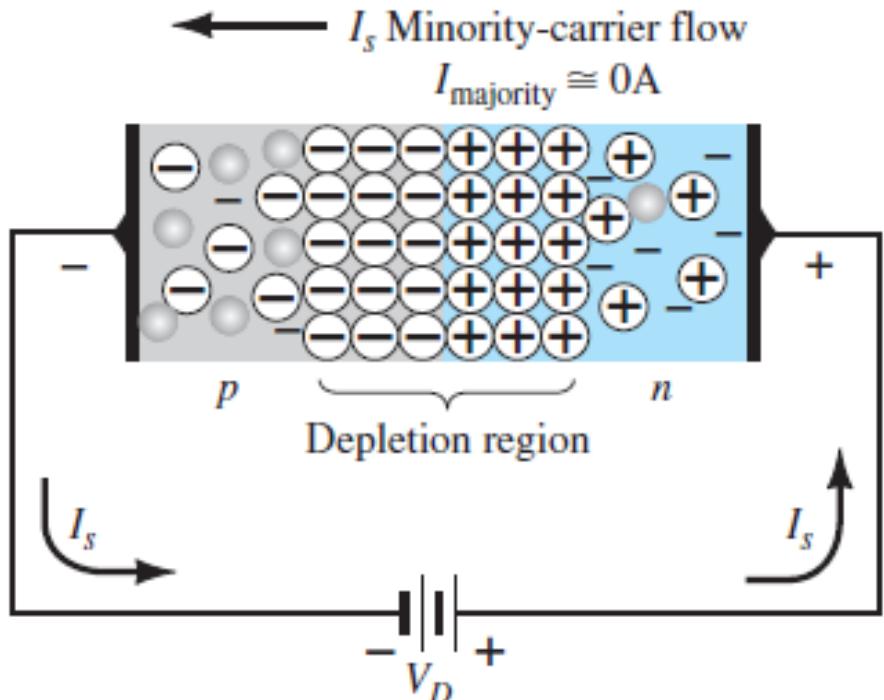
+ $V_D = 0 \text{ V}$ -
(no bias)



نیمه هادیها و دیود با پاس مستقیم دیوید:



نیمه هادیها و دیود با پاس معکوس دیود: ۵



نیمه هادیها و دیود ارتباط میان جریان دیود با ولتاژ دو سر آن:

It can be demonstrated through the use of solid-state physics that the general characteristics of a semiconductor diode can be defined by the following equation, referred to as Shockley's equation, for the forward- and reverse-bias regions:

$$I_D = I_s(e^{V_D/nV_T} - 1) \quad (A)$$

where I_s is the reverse saturation current

V_D is the applied forward-bias voltage across the diode

n is an ideality factor, which is a function of the operating conditions and physical construction; it has a range between 1 and 2 depending on a wide variety of factors ($n = 1$ will be assumed throughout this text unless otherwise noted).

The voltage V_T in Eq. (1.1) is called the *thermal voltage* and is determined by

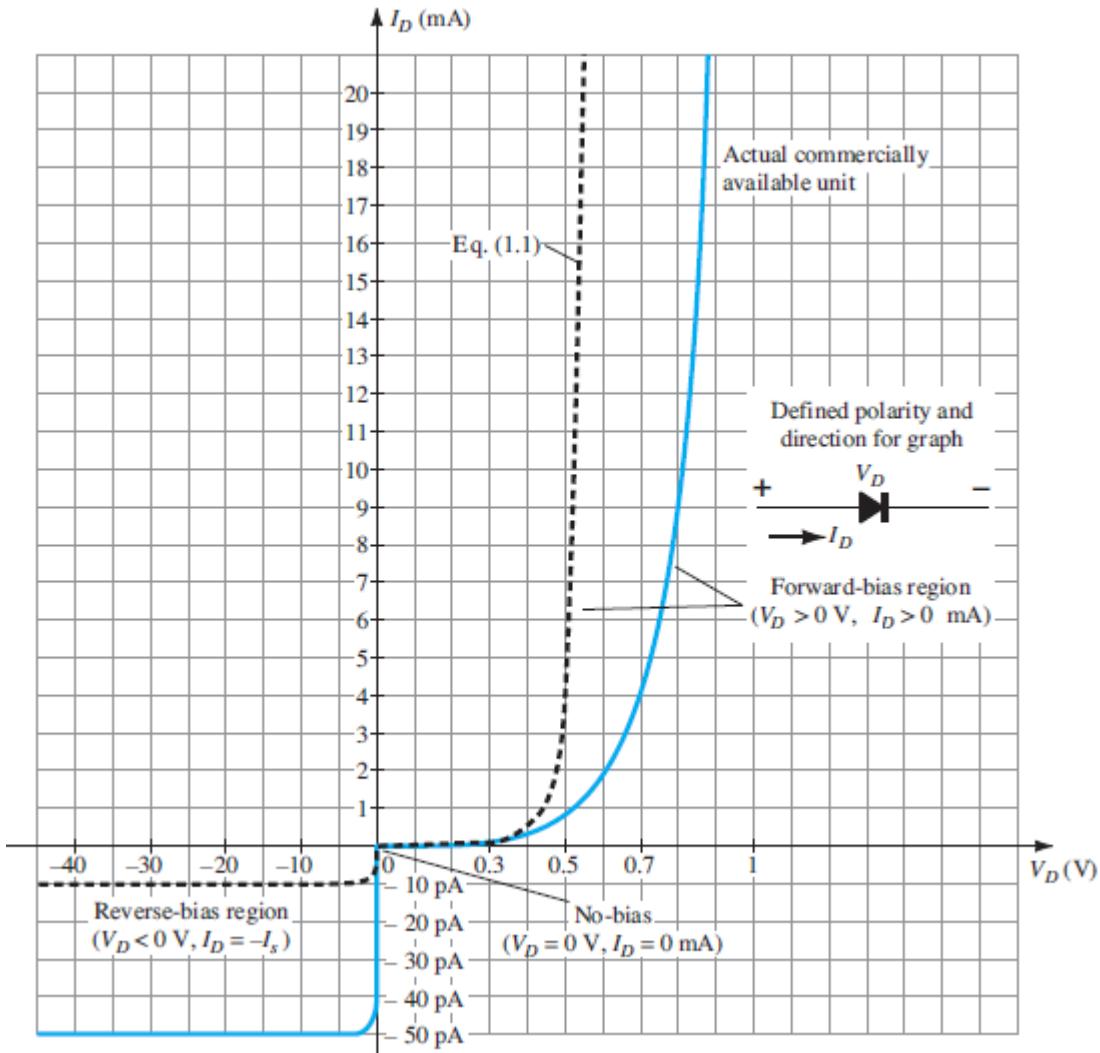
$$V_T = \frac{kT_K}{q} \quad (V) \quad (1.3)$$

where k is Boltzmann's constant = 1.38×10^{-23} J/K

T_K is the absolute temperature in kelvins = $273 +$ the temperature in °C

q is the magnitude of electronic charge = 1.6×10^{-19} C

نیمه هادیها و دیود ارتباط میان جریان دیود با ولتاژ دو سر آن:



نیمه هادیها و دیود ارتباط میان جریان دیود با ولتاژ دو سر آن: ناحیه شکست معکوس

Even though the scale of Fig. 1.15 is in tens of volts in the negative region, there is a point where the application of too negative a voltage with the reverse polarity will result in a sharp change in the characteristics, as shown in Fig. 1.17. The current increases at a very rapid rate in a direction opposite to that of the positive voltage region. The reverse-bias potential that results in this dramatic change in characteristics is called the *breakdown potential* and is given the label V_{BV} .

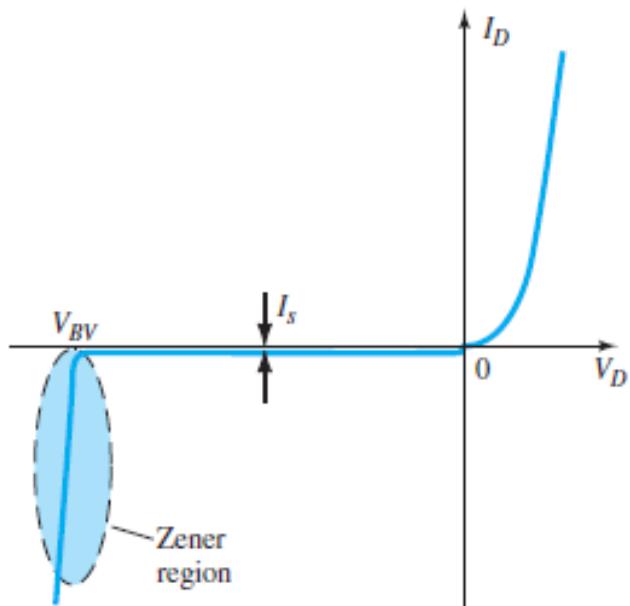
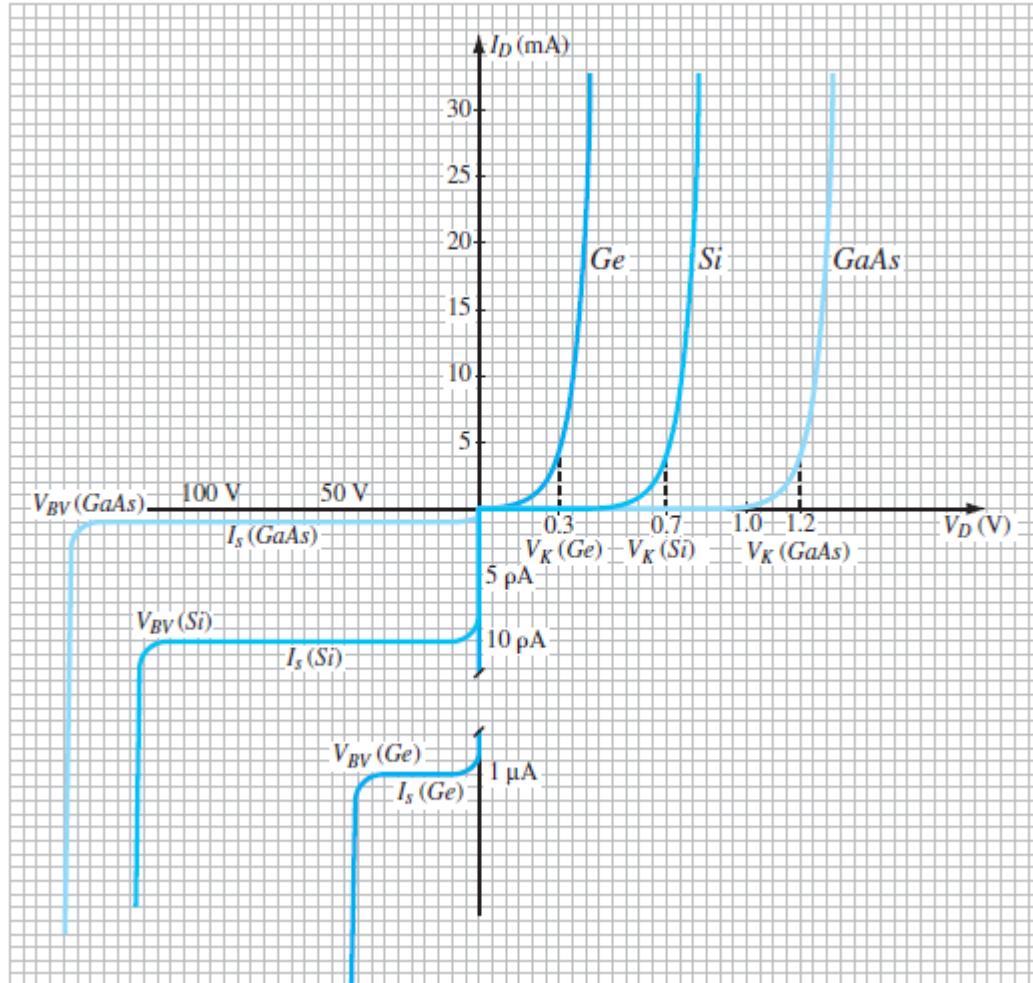


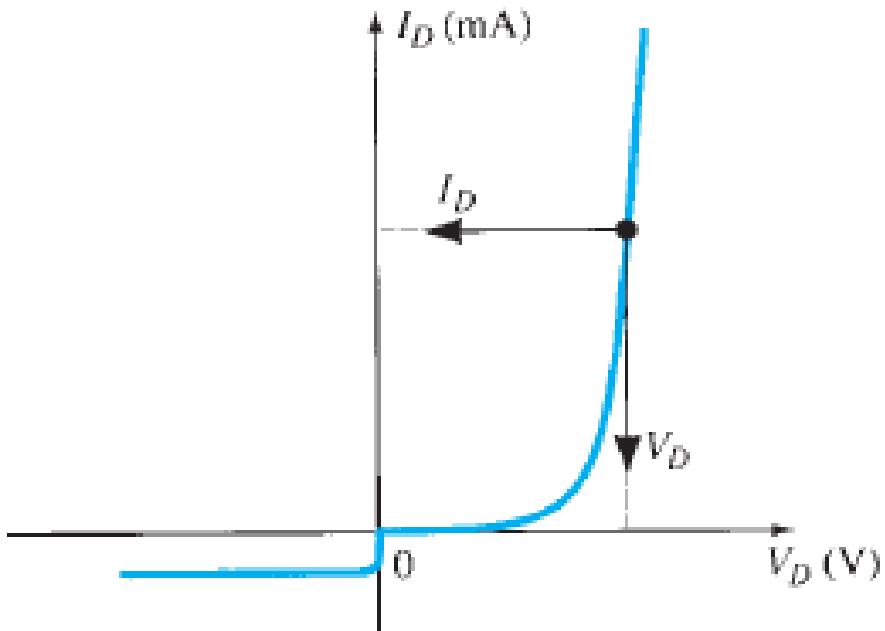
FIG. 1.17
Breakdown region.

نیمه هادیها و دیود

ارتباط میان جریان و ولتاژ در نیمه هادیهای Si و Ge و GaAs

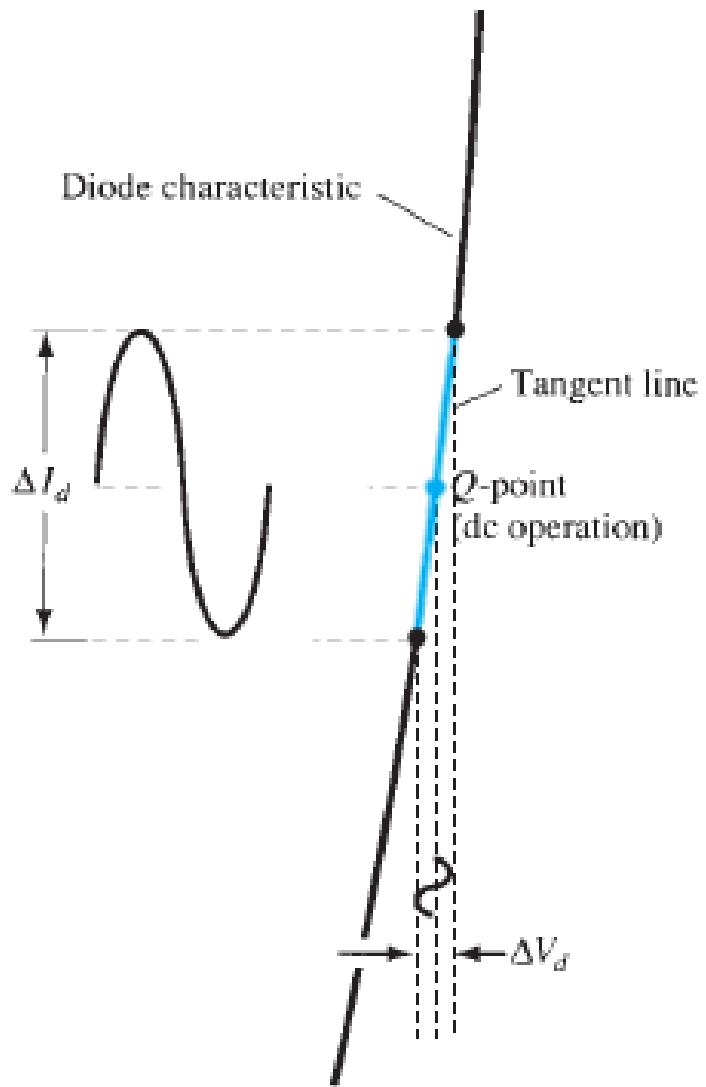


نیمه هادیها و دیود مقاومت DC دیود:



$$R_D = \frac{V_D}{I_D}$$

نیمه هادیها و دیود مقاومت دینامیکی دیود:



$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d}$$

$$r_d = \frac{26 \text{ mV}}{I_D}$$

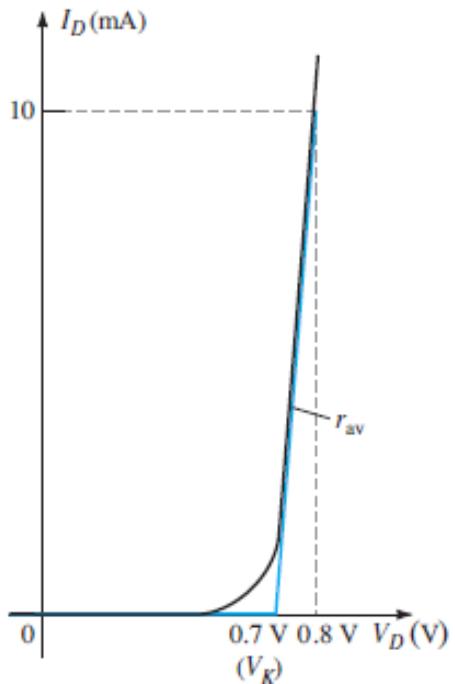
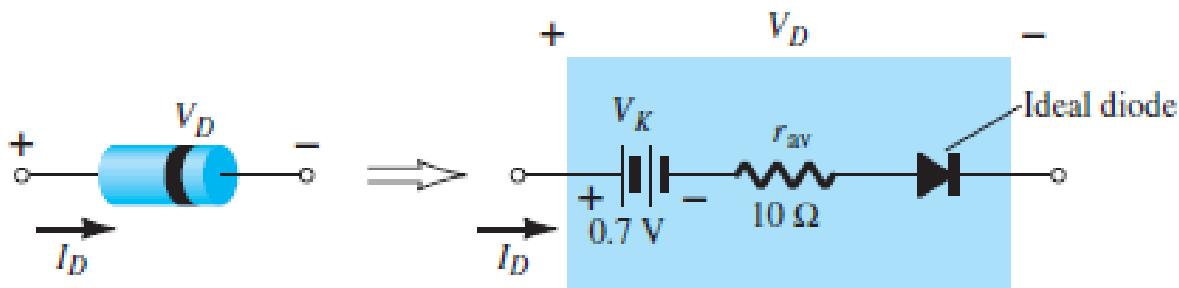


FIG. 1.29

Defining the piecewise-linear equivalent circuit using straight-line segments to approximate the characteristic curve.



نیمه هادیها و دیود
مدار معادل دیود

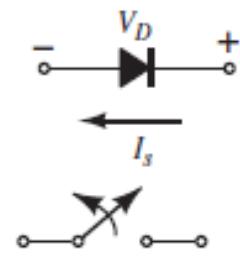
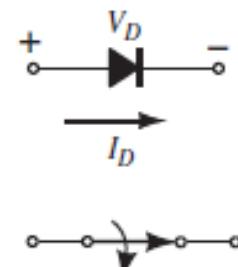
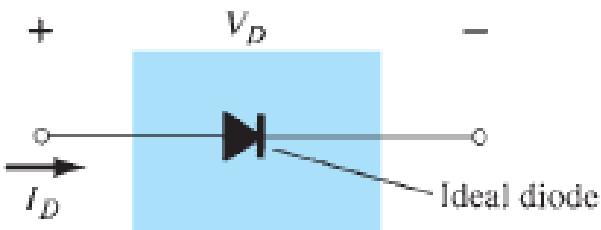
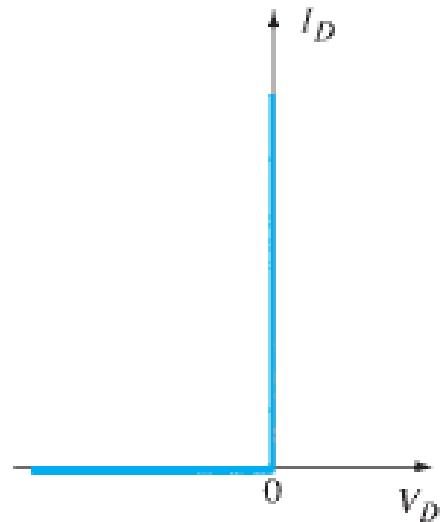
FIG. 1.30
Components of the piecewise-linear equivalent circuit.

The approximate level of r_{av} can usually be determined from a specified operating point on the specification sheet (to be discussed in Section 1.10). For instance, for a silicon semiconductor diode, if $I_F = 10$ mA (a forward conduction current for the diode) at $V_D = 0.8$ V, we know that for silicon a shift of 0.7 V is required before the characteristics rise, and we obtain

$$r_{av} = \left. \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \right|_{pt. to pt.} = \frac{0.8\ V - 0.7\ V}{10\ mA - 0\ mA} = \frac{0.1\ V}{10\ mA} = 10\ \Omega$$

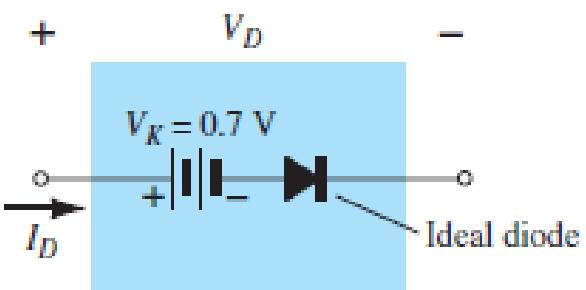
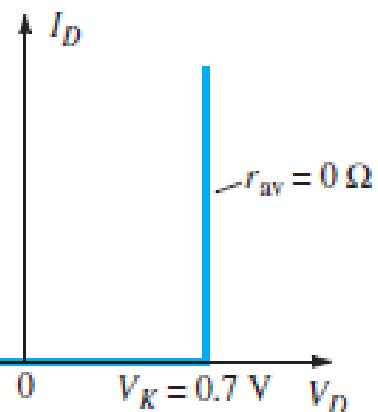
as obtained for Fig. 1.29.

نیمه هادیها و دیود مدار معادل ساده شده و مدار معادل دیود آید



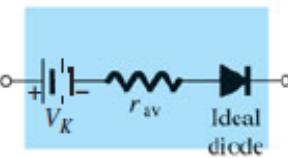
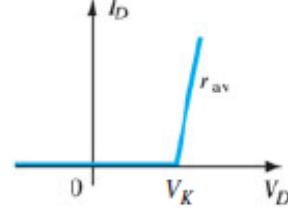
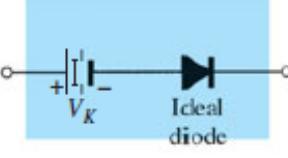
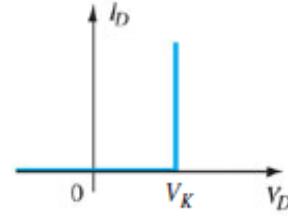
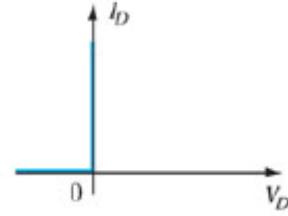
(a)

(b)

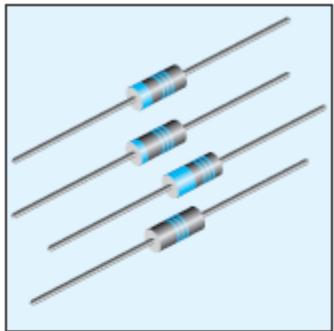


نیمه هادیها و دیود خلاصه مدار معادل دیود

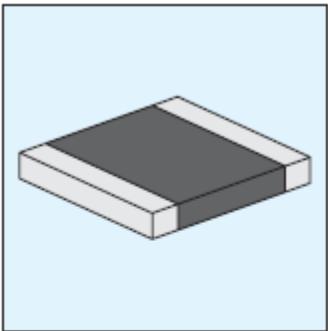
TABLE 1.7
Diode Equivalent Circuits (Models)

| Type | Conditions | Model | Characteristics |
|------------------------|--|---|---|
| Piecewise-linear model | |  |  |
| Simplified model | $R_{\text{network}} \gg r_{\text{av}}$ |  |  |
| Ideal device | $R_{\text{network}} \gg r_{\text{av}}$ $E_{\text{network}} \gg V_K$ |  |  |

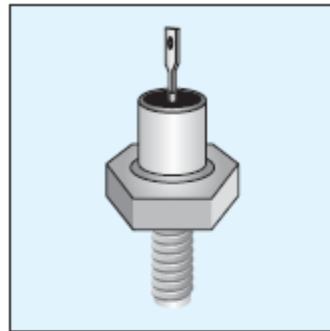
نیمه هادیها و دیود انواع مدل‌های تجاری دیود



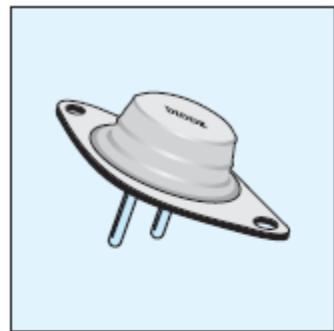
General purpose diode



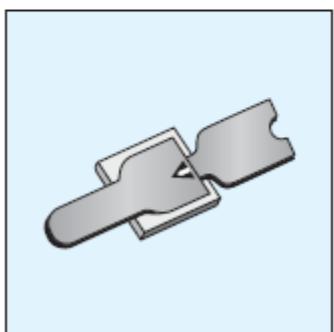
Surface mount high-power PIN diode



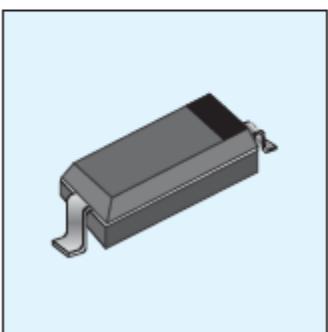
Power (stud) diode



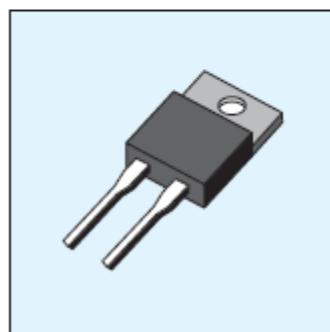
Power (planar) diode



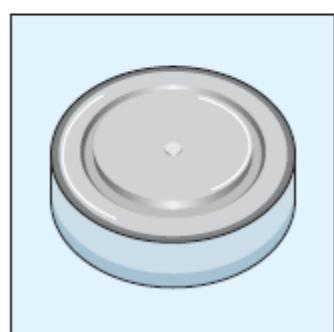
Beam lead pin diode



Flat chip surface mount diode



Power diode

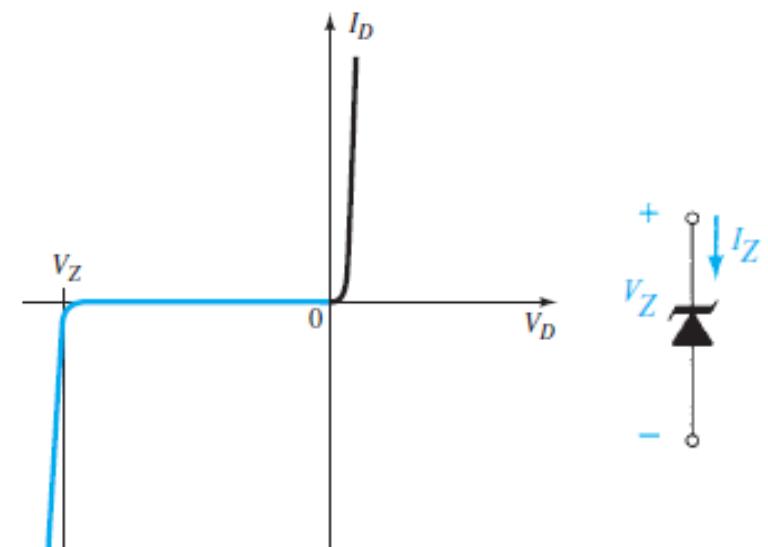


Power (disc, puck) diode

نیمه هادیها و دیود

انواع دیود: زنر

دیودهایی که به منظور استفاده در ناحیه شکست معکوس ساخته شده‌اند به دیود زنر معروف هستند. چون دیود زنر باید به صورت معکوس بایاس شود کاند آن به قطب مثبت منبع ولتاژ و آند آن به قطب منفی وصل می‌شود. در این صورت جهت جریان از کاتد به آند خواهد بود. معمولاً کارخانه سازنده یک جریان حداقل I_K و یک جریان حداکثر مشخص می‌نماید که تغییرات جریان دیود زنر باید محدود به آنها شود ($I_K \leq i_Z \leq I_{Z,max}$). قابل توجه است که مشخصه دیود زنر در حالت بایاس مستقیم مشابه دیودهای معمولی است. از دیود زنر جهت ثبت ولتاژ در تنظیم‌کننده‌های ولتاژ استفاده می‌شود. در فصل ۳ مدارهای تنظیم‌کننده ولتاژ ساده مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت.



نیمه هادیها و دیود انواع دیود: زنر: اداه

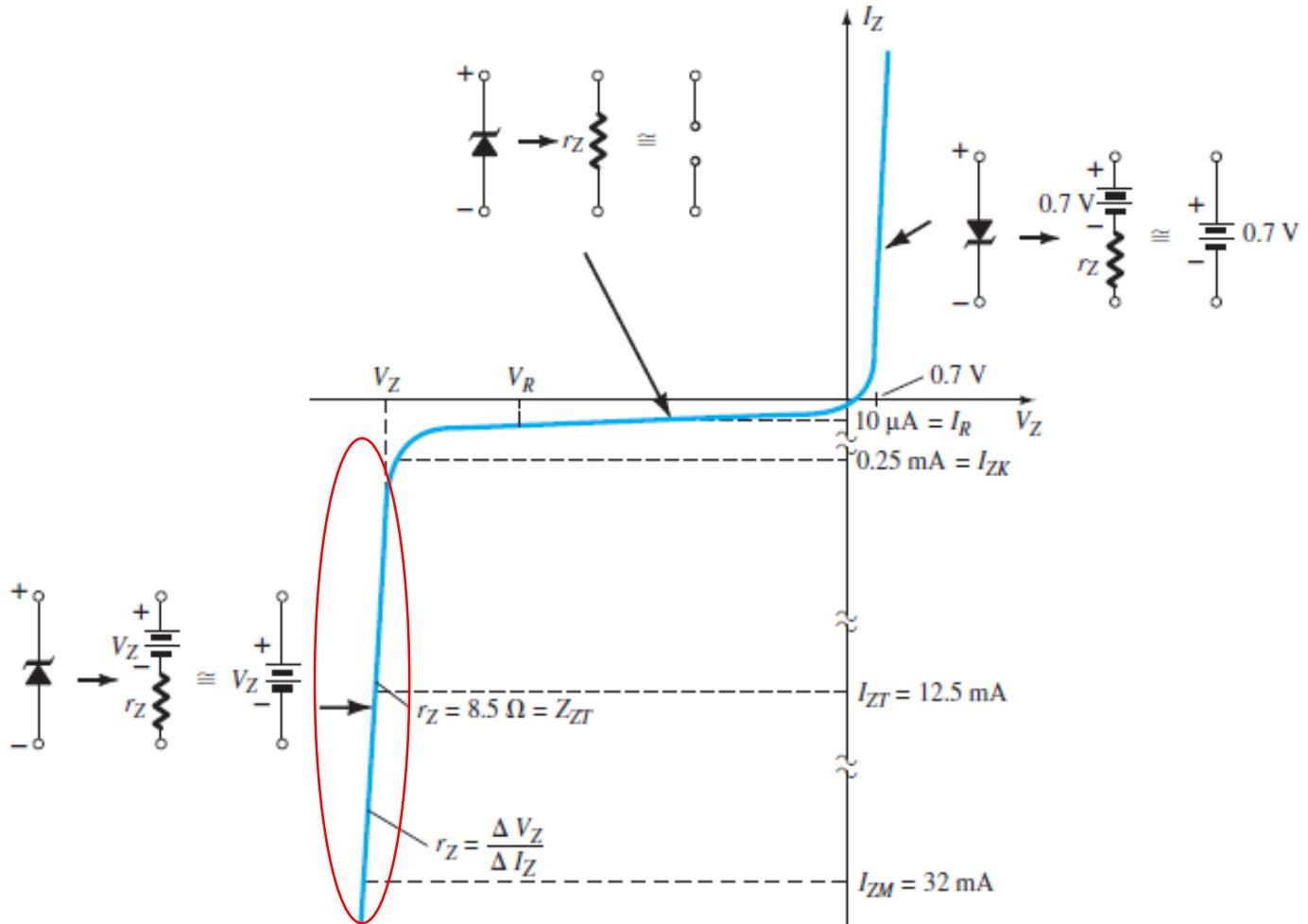
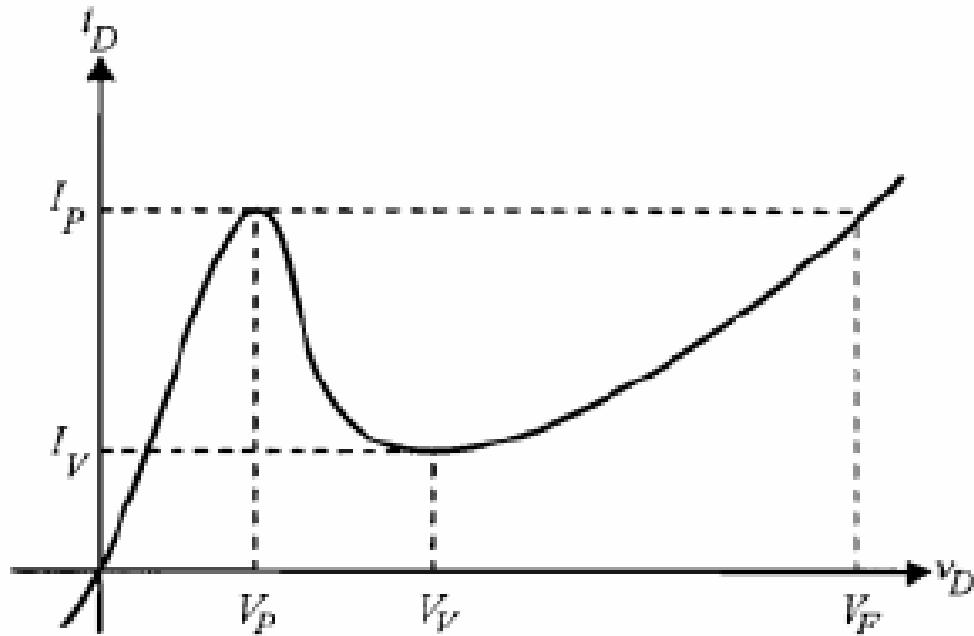
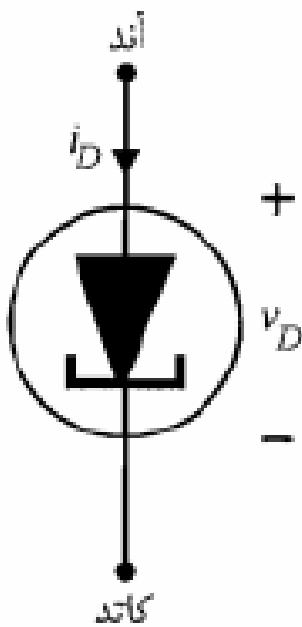


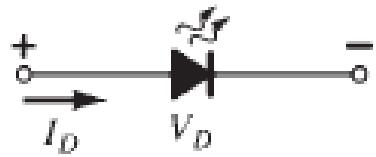
FIG. 1.47

Zener diode characteristics with the equivalent model for each region.

نیمه هادیها و دیود انواع دیود: ټونلی



شکل ۱۴-۲: علامت مداری و مشخصه دیود ټونلی



نیمه هادیها و دیود انواع دیود: نورانی

دیودهای نورانی معمولاً از بلور نیمه هادی گالیم-ارسینیک ($Ga-As$) ساخته می شوند. در آینه بلور بازده ترکیب مجدد الکترون آزاد و حفره بسیار بیشتر از بلورهای سیلیکن یا ژرمانیم است. نکته دیگر در مورد این بلور آن است که آزاد شدن انرژی در هر ترکیب مجدد به صورت تابش یک فوتون نوری است. در بلورهای سیلیکن و ژرمانیم این انرژی به شکل دما تلف می شود. مشخصه دیودهای نورانی مشابه دیودهای معمولی است. تنها، تفاوت در ولتاژ آستانه هدایت است که در دیودهای نورانی مادون قرمز تا سبز مقدار آن از 1.9 تا 2.9 ولت تغییر می کند. دیودهای نورانی به صورت مستقیم بایاس می شوند. با افزایش جریان مستقیم، تولید فوتونهای نوری زیادتر شده و در نتیجه شدت نور تابشی افزایش می یابد.

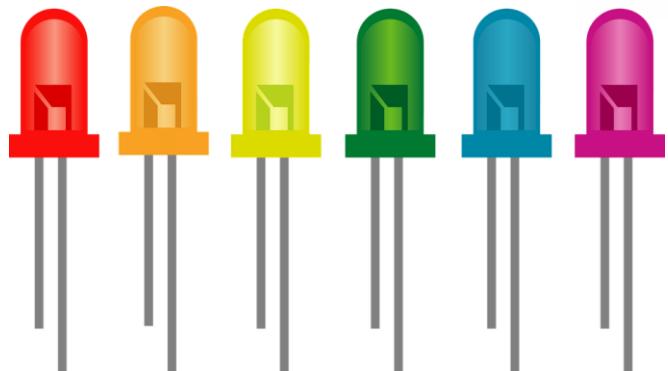
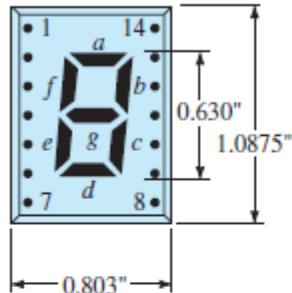


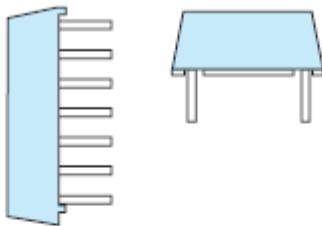
TABLE 1.9
Light-Emitting Diodes

| Color | Construction | Typical Forward Voltage (V) |
|--------|--------------|-----------------------------|
| Amber | AlInGaP | 2.1 |
| Blue | GaN | 5.0 |
| Green | GaP | 2.2 |
| Orange | GaAsP | 2.0 |
| Red | GaAsP | 1.8 |
| White | GaN | 4.1 |
| Yellow | AlInGaP | 2.1 |

نیمه هادیها و دیود انواع دیود: نورانی: ادامه



(a)

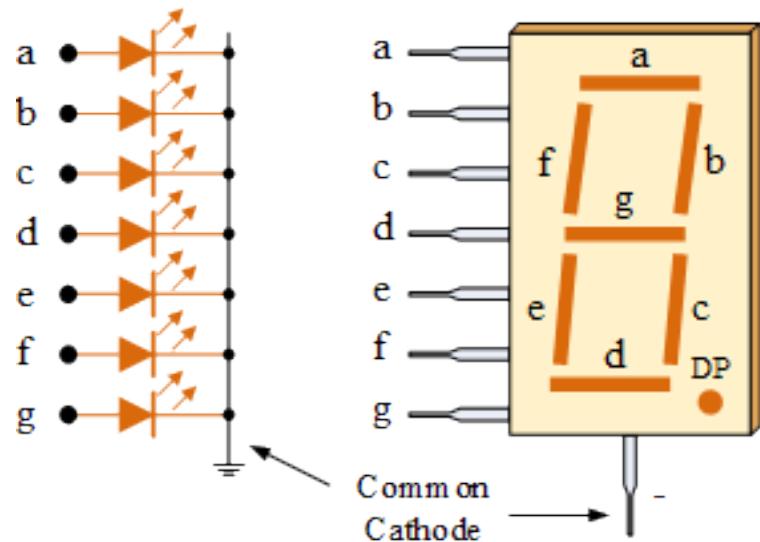
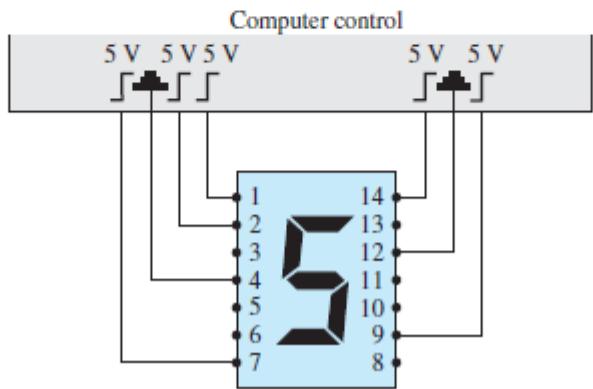
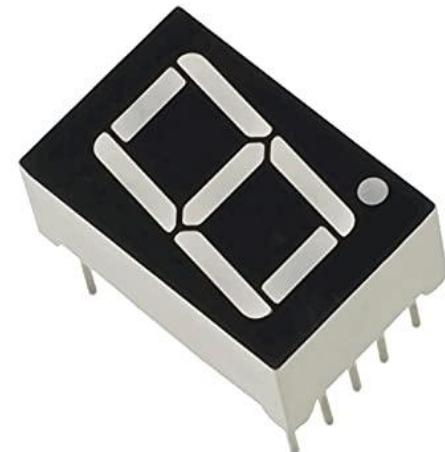


COMMON CATHODE

PIN # FUNCTION

1. Anode f
2. ANODE g
3. NO PIN
4. COMMON CATHODE
5. NO PIN
6. ANODE e
7. ANODE d
8. ANODE c
9. ANODE b
10. NO PIN
11. NO PIN
12. COMMON CATHODE
13. ANODE b
14. ANODE a

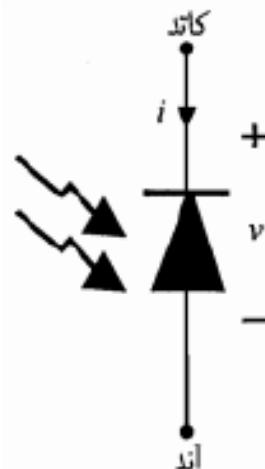
(b)



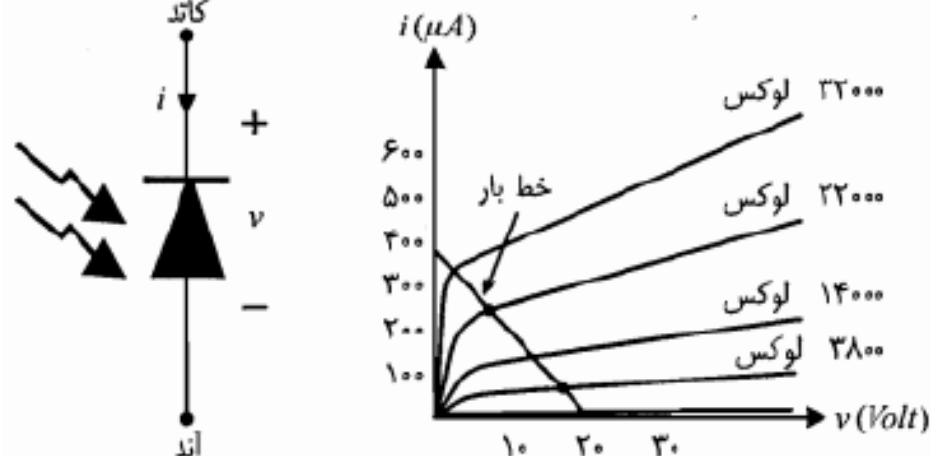
در این نوع دیود، شدت جریان معکوس تقریباً متناسب با شدت نور تابش شده به سطح آن می‌باشد. این نوع دیود در حقیقت یک پیوند $P-N$ معمولی است که در داخل یک پوشش پلاستیکی که یک طرف آن شفاف می‌باشد فرار گرفته است.

دیود نوری به صورت معکرس باش می‌شود. با تابش فوتونهای نوری به محل پیوند و جذب این فوتونها توسط الکترونهای پیوندهای کرووالان انتهای نیمه‌هادی، به میزان حاملهای اقلیت افزوده، شده و جریان این حاملها تشدید می‌شود. معمولاً مشخصه ولتاژ - جریان دیودهای نوری توسط کارخانه سازنده داده می‌شود. در این مشخصه‌ها تغییرات جریان معکوس دیود بر حسب ولتاژ معکوس دو سر آن به ازای مقادیر مختلف شار نورانی نمایش داده می‌شود. در شکل ۱۵-۲ ۱۵ غلامت مداری دیود نوری در کنار یک مشخصه نمونه نشان داده شده است.

دیودهای نوری در صنعت کاربردهای زیادی دارند. از جمله در خواندن اطلاعات کارتاهای سوراخ شده کامپیوتري، شمردن اشباء در خط تولید، کلیدهای نوری و نیز در مخابرات فiber نوری به کار می‌روند.

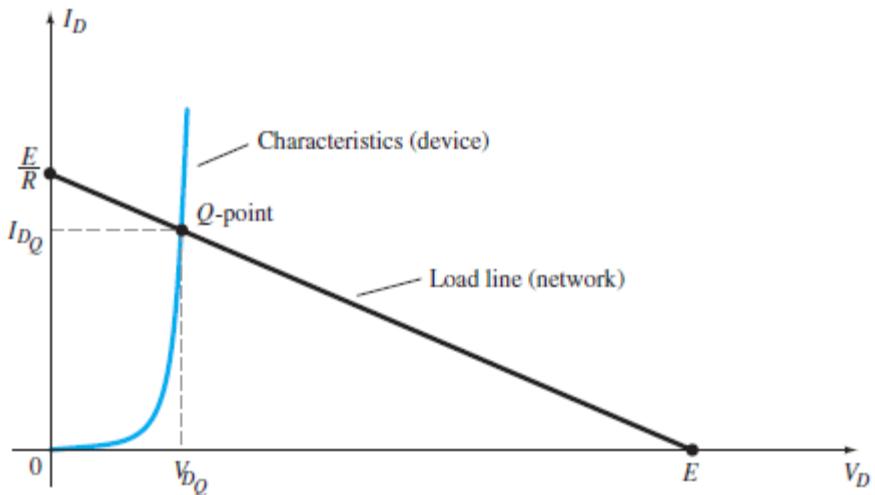
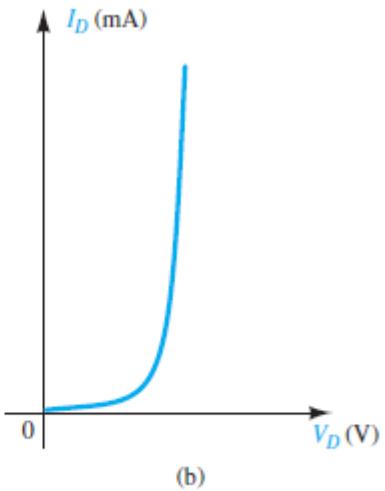
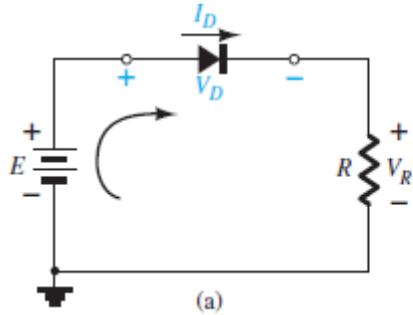


نیمه هادیها و دیود انواع دیود: نوری



تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی

تحلیل خط بار DC:



$$+E - V_D - V_R = 0$$

$$E = V_D + I_D R$$

a. Eq. (2.2): $I_D = \frac{E}{R} \Big|_{V_D=0 \text{ V}}$

Eq. (2.3): $V_D = E \Big|_{I_D=0 \text{ A}}$

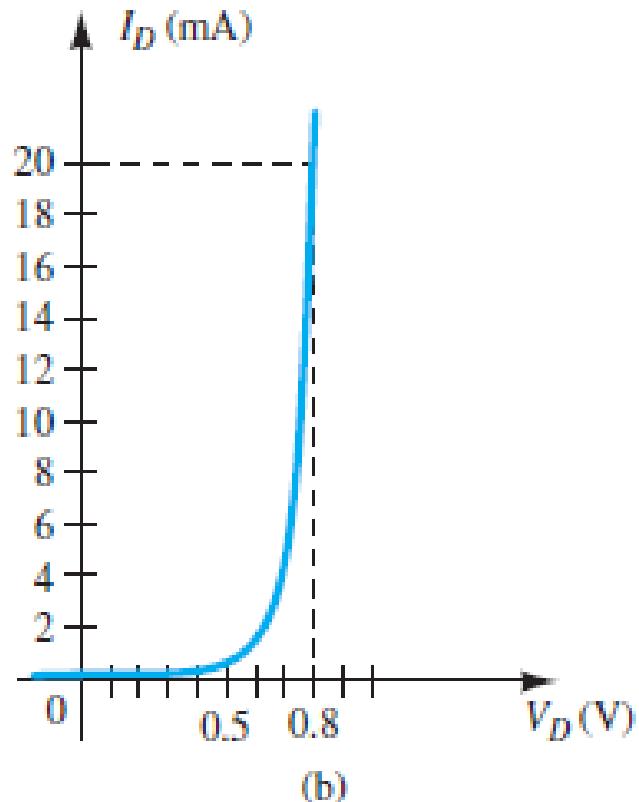
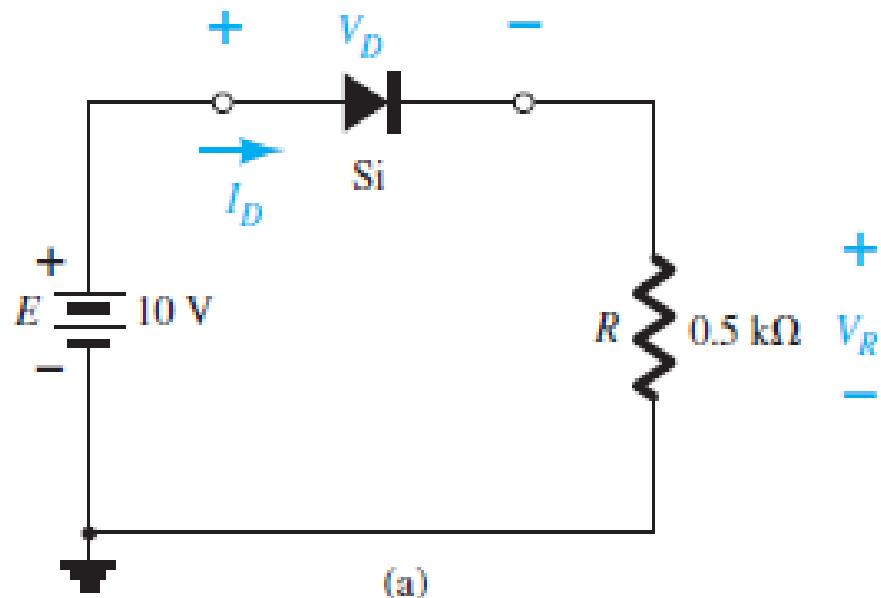
$$I_D = \frac{E}{R} - \frac{V_D}{R} \quad [\text{derived from Eq. (2.1)}]$$

$$I_D = I_s(e^{V_D/nV_T} - 1)$$

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی تحلیل خط بار DC: مثال

EXAMPLE 2.1 For the series diode configuration of Fig. 2.3a, employing the diode characteristics of Fig. 2.3b, determine:

- V_{DQ} and I_{DQ} .
- V_R .



تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی

تحلیل خط بار DC: مثال

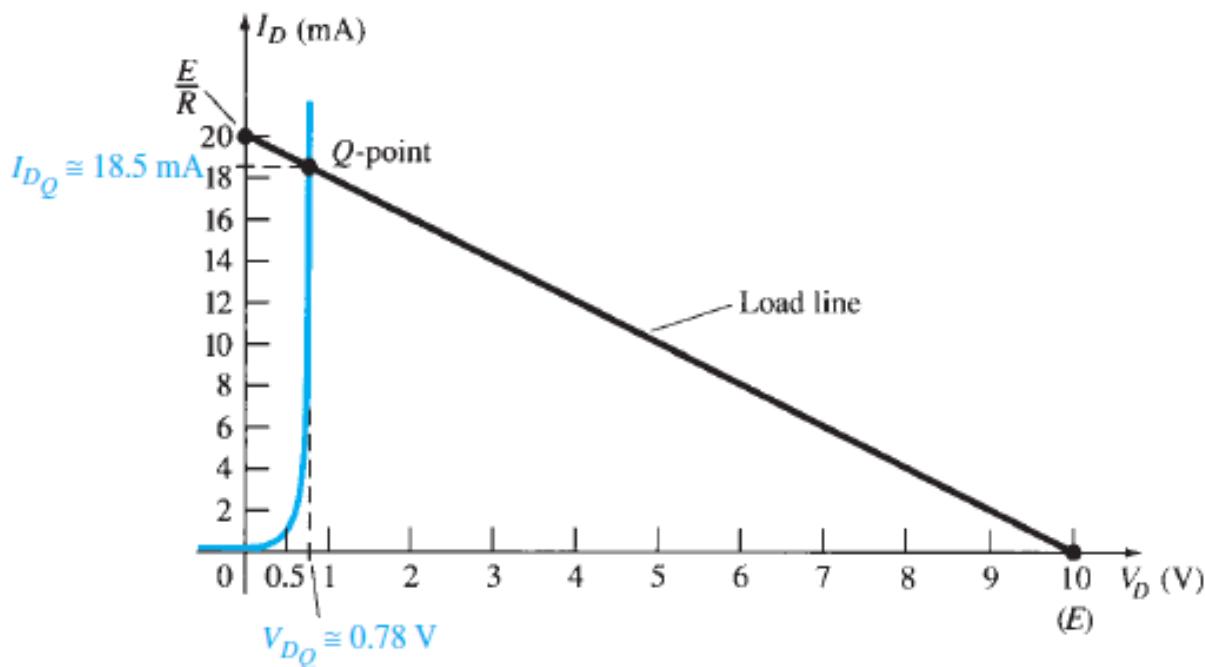
The resulting load line appears in Fig. 2.4. The intersection between the load line and the characteristic curve defines the Q -point as

$$V_{D_Q} \cong 0.78 \text{ V}$$

$$I_{D_Q} \cong 18.5 \text{ mA}$$

The level of V_D is certainly an estimate, and the accuracy of I_D is limited by the chosen scale. A higher degree of accuracy would require a plot that would be much larger and perhaps unwieldy.

b. $V_R = E - V_D = 10 \text{ V} - 0.78 \text{ V} = 9.22 \text{ V}$



تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی

تحلیل خط بار DC: ادامه مثال

Using the Q -point values, the dc resistance for Example 2.1 is

$$R_D = \frac{V_{DQ}}{I_{DQ}} = \frac{0.78 \text{ V}}{18.5 \text{ mA}} = 42.16 \Omega$$

An equivalent network (for these operating conditions only) can then be drawn as shown in Fig. 2.5.

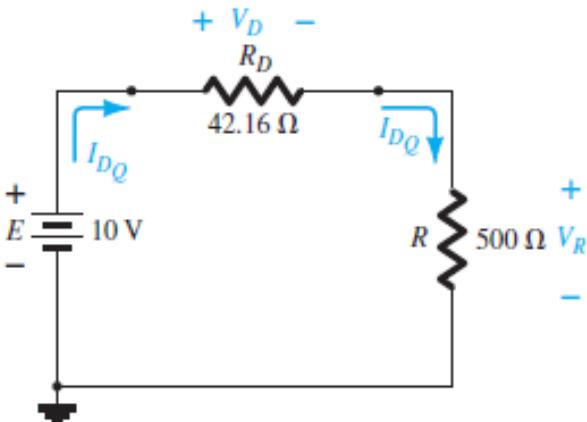


FIG. 2.5
Network equivalent to Fig. 2.4.

The current

$$I_D = \frac{E}{R_D + R} = \frac{10 \text{ V}}{42.16 \Omega + 500 \Omega} = \frac{10 \text{ V}}{542.16 \Omega} \approx 18.5 \text{ mA}$$

and $V_R = \frac{RE}{R_D + R} = \frac{(500 \Omega)(10 \text{ V})}{42.16 \Omega + 500 \Omega} = 9.22 \text{ V}$

matching the results of Example 2.1.

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی

مثال:

EXAMPLE 2.9 Determine I , V_1 , V_2 , and V_o for the series dc configuration of Fig. 2.25.

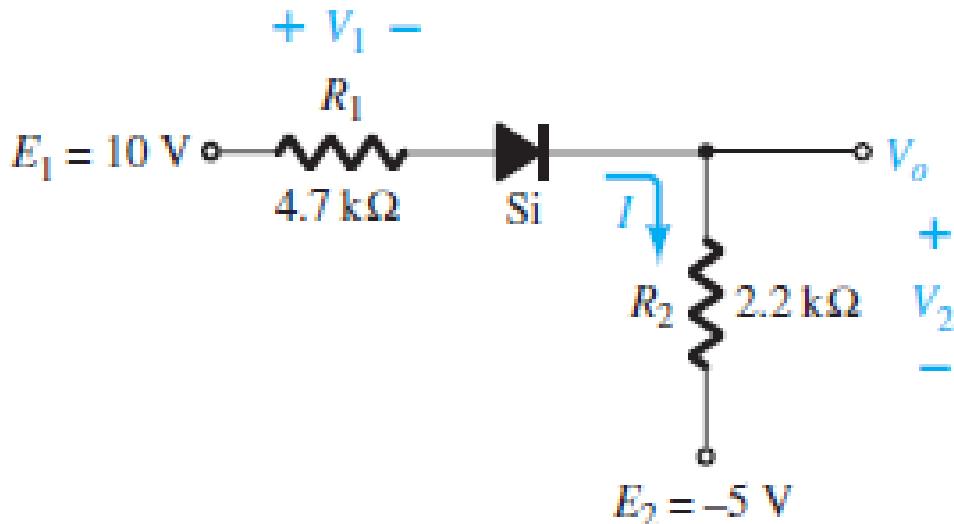


FIG. 2.25

Solution: The sources are drawn and the current direction indicated as shown in Fig. 2.26. The diode is in the “on” state and the notation appearing in Fig. 2.27 is included to indicate this state. Note that the “on” state is noted simply by the additional $V_D = 0.7$ V on the figure. This eliminates the need to redraw the network and avoids any confusion that may

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی

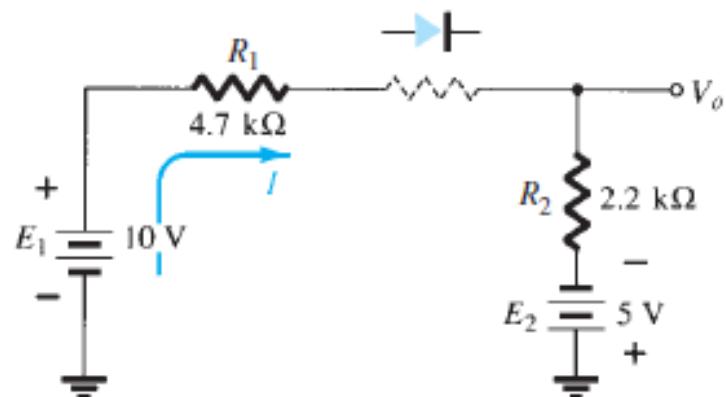


FIG. 2.26

Determining the state of the diode for the network of Fig. 2.25.

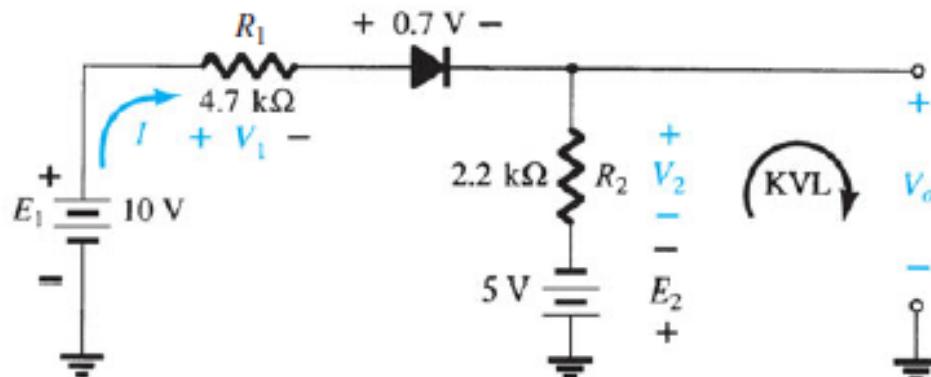


FIG. 2.27

Determining the unknown quantities for the network of Fig. 2.25. *KVL*, Kirchhoff voltage loop.

$$I = \frac{E_1 + E_2 - V_D}{R_1 + R_2} = \frac{10 \text{ V} + 5 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{4.7 \text{ k}\Omega + 2.2 \text{ k}\Omega} = \frac{14.3 \text{ V}}{6.9 \text{ k}\Omega}$$

$$\approx 2.07 \text{ mA}$$

and the voltages are

$$V_1 = IR_1 = (2.07 \text{ mA})(4.7 \text{ k}\Omega) = 9.73 \text{ V}$$

$$V_2 = IR_2 = (2.07 \text{ mA})(2.2 \text{ k}\Omega) = 4.55 \text{ V}$$

Applying Kirchhoff's voltage law to the output section in the clockwise direction results in

$$-E_2 + V_2 - V_o = 0$$

and

$$V_o = V_2 - E_2 = 4.55 \text{ V} - 5 \text{ V} = -0.45 \text{ V}$$

The minus sign indicates that V_o has a polarity opposite to that appearing in Fig. 2.25.

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی مثال:

EXAMPLE 2.8 Determine I_D , V_{D_2} , and V_o for the circuit of Fig. 2.21.

Solution: Removing the diodes and determining the direction of the resulting current I result in the circuit of Fig. 2.22. There is a match in current direction for one silicon diode but not for the other silicon diode. The combination of a short circuit in series with an open circuit always results in an open circuit and $I_D = 0$ A, as shown in Fig. 2.23.

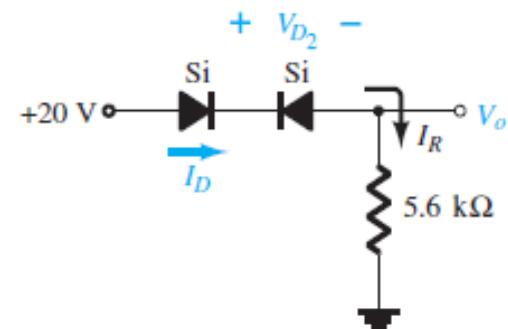


FIG. 2.21
Circuit for Example 2.8.

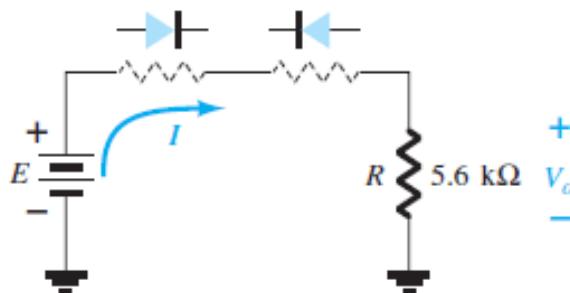


FIG. 2.22
Determining the state of the diodes of Fig. 2.21.

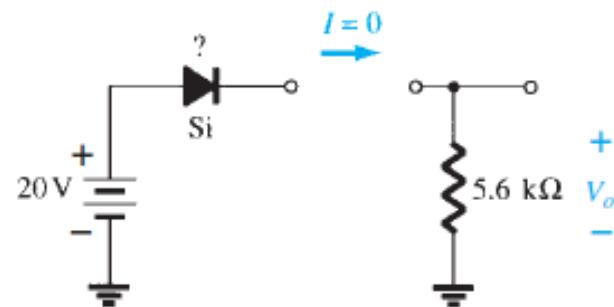


FIG. 2.23
Substituting the equivalent state for the open diode.

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی ادامه مثال:

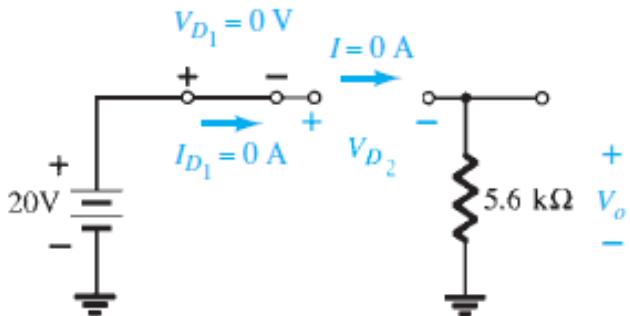


FIG. 2.24

Determining the unknown quantities for the circuit of Example 2.8.

The question remains as to what to substitute for the silicon diode. For the analysis to follow in this and succeeding chapters, simply recall for the actual practical diode that when $I_D = 0 \text{ A}$, $V_D = 0 \text{ V}$ (and vice versa), as described for the no-bias situation in Chapter 1. The conditions described by $I_D = 0 \text{ A}$ and $V_{D1} = 0 \text{ V}$ are indicated in Fig. 2.24. We have

$$V_o = I_R R = I_D R = (0 \text{ A})R = 0 \text{ V}$$

and $V_{D2} = V_{\text{open circuit}} = E = 20 \text{ V}$

Applying Kirchhoff's voltage law in a clockwise direction gives

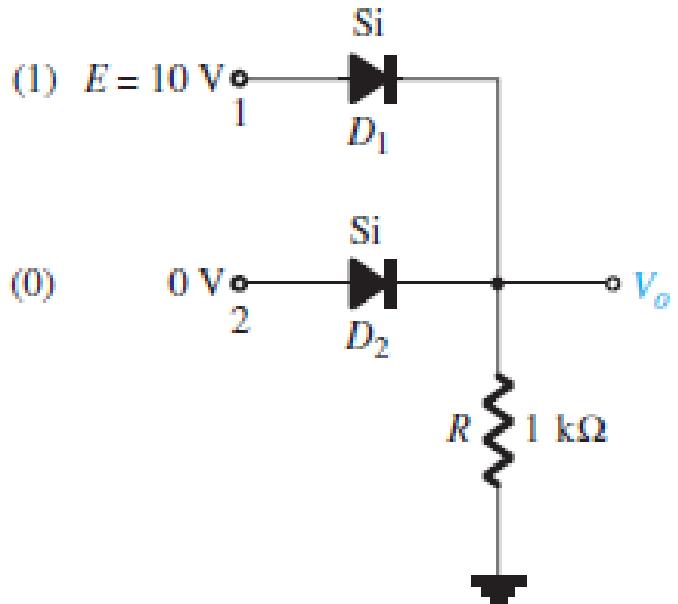
$$E - V_{D1} - V_{D2} - V_o = 0$$

and $V_{D2} = E - V_{D1} - V_o = 20 \text{ V} - 0 - 0$
 $= 20 \text{ V}$

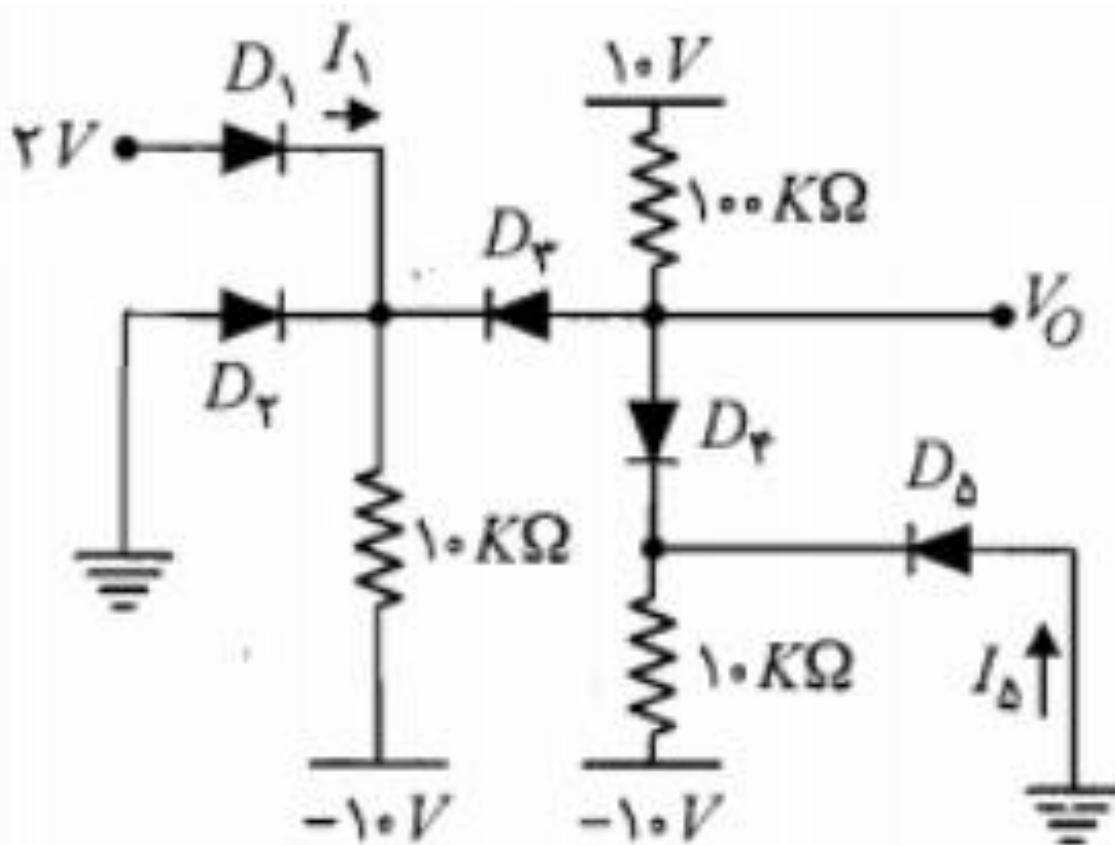
with $V_o = 0 \text{ V}$

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیوودی

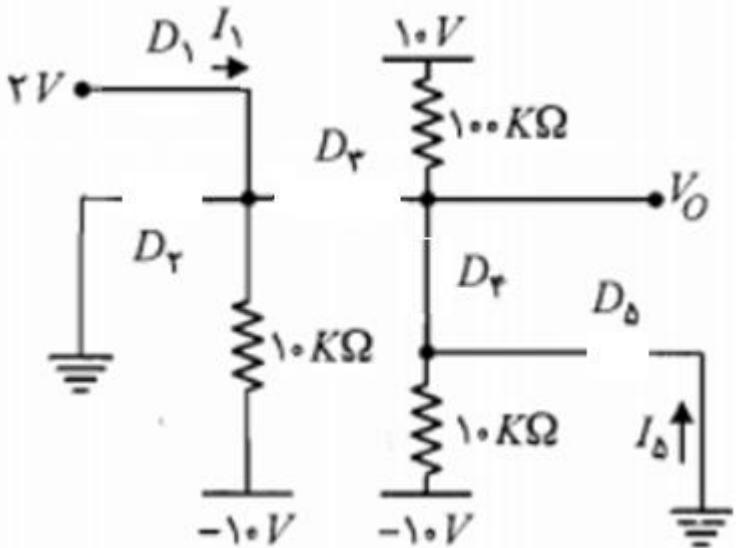
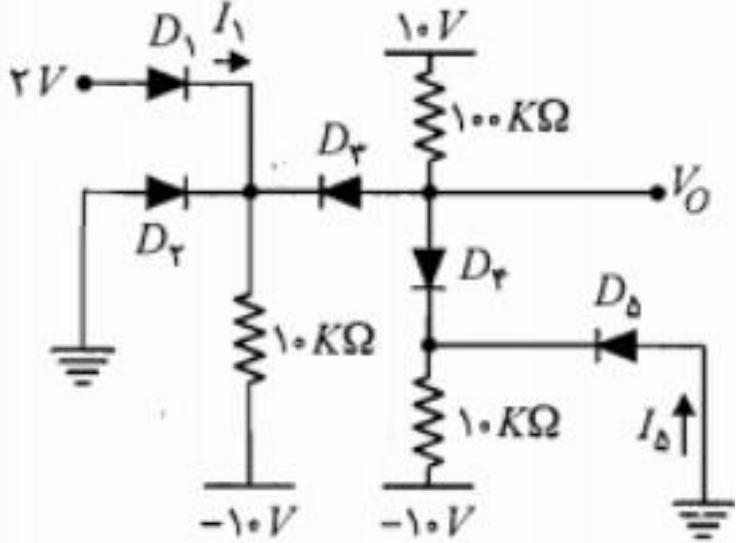
تمرین: (به عهده دانشجو)



تمرین: در مدار شکل زیر تمام دیودها ایده آل (در حالت روشن بودن: اتصال کوتاه) فرض شده اند. در این صورت ولتاژ V_0 و جریانهای ۱ و ۱۵ را محاسبه کنید.



۱۵۱مین تمرین: (به عهد دانشجو)



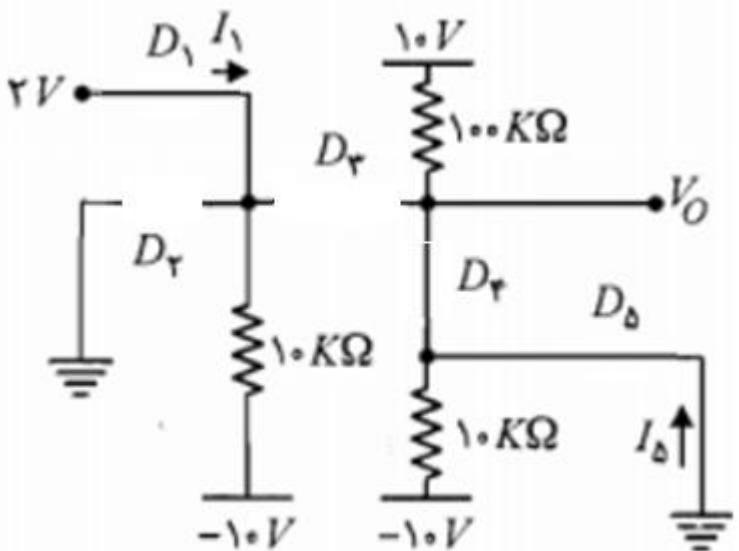
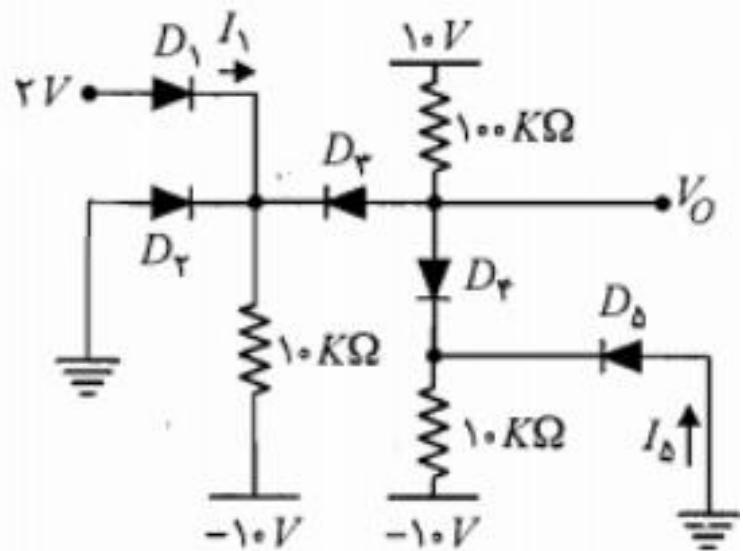
تناقض

$$KVL: I_1 = \frac{2+10}{10} = 1.2mA \rightarrow i_{D1} > 0, V_{A_{D2}} = 0, V_{K_{D2}} = 2 \rightarrow V_{A_{D2}} < V_{K_{D2}}$$

$$KVL: i_{D4} = \frac{10+10}{110} = 0.18mA \rightarrow i_{D4} > 0, V_{A_{D3}} = 10 - 100i_{D4} = -8.1, V_{K_{D3}} = 2 \rightarrow V_{A_{D3}} < V_{K_{D3}}$$

$$V_{A_{D5}} = 0V, V_{K_{D5}} = -8.1V \rightarrow V_{A_{D5}} < V_{K_{D5}} \times$$

۱۵۰م تمرین: (به عهدہ دانشجو)

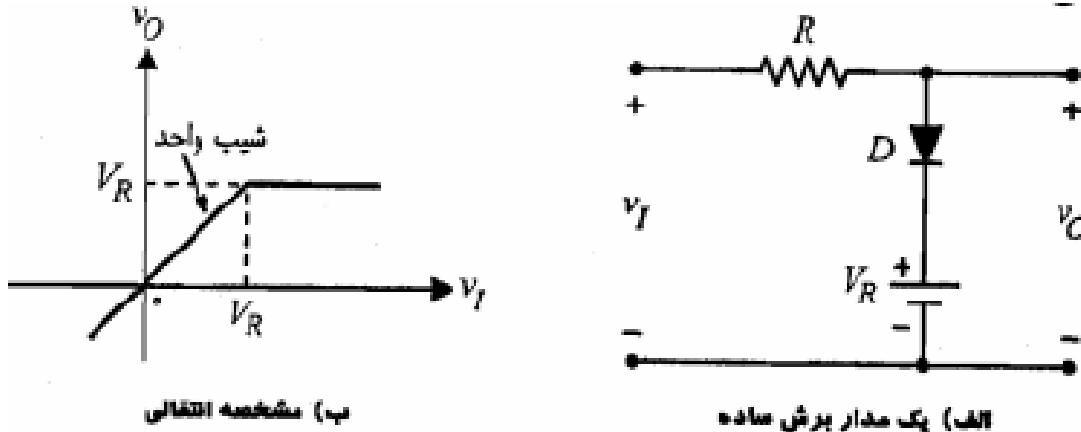


$$KVL: I_1 = \frac{2+10}{10} = 1.2mA \rightarrow i_{D1} > 0, V_{A_{D2}} = 0, V_{K_{D2}} = 2 \rightarrow V_{A_{D2}} < V_{K_{D2}}$$

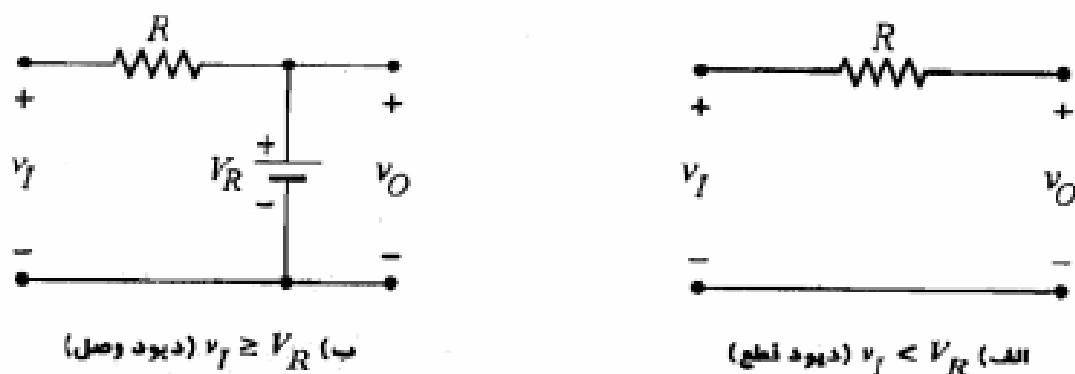
$$KVL: i_{D4} = \frac{10-0}{100} = 0.1mA \rightarrow i_{D4} > 0, V_{A_{D3}} = 0, V_{K_{D3}} = 2 \rightarrow V_{A_{D3}} < V_{K_{D3}}$$

$$KCL: \frac{10-0}{100} + I_5 = \frac{0+10}{10} \rightarrow I_5 = 0.9mA > 0 = i_{D5}, V_O = 0$$

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی مدارات برش دهنده: دیود در وضعیت ایده‌آل

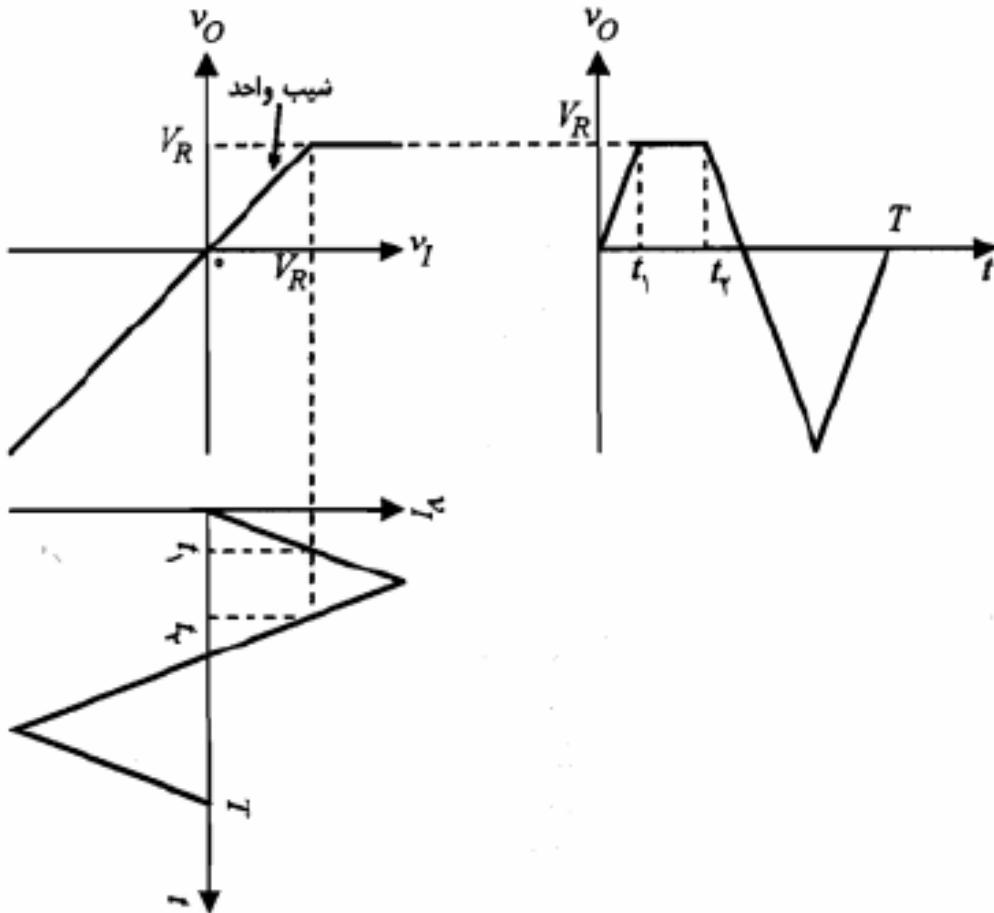


شکل ۳-۱۶: مدار برش



شکل ۳-۱۷: مدارهای معادل مدار شکل ۳-۱۶

تجزیه و تحلیل و گاربردهای مدارهای دیودی مدارات برش دهنده: ۰۵

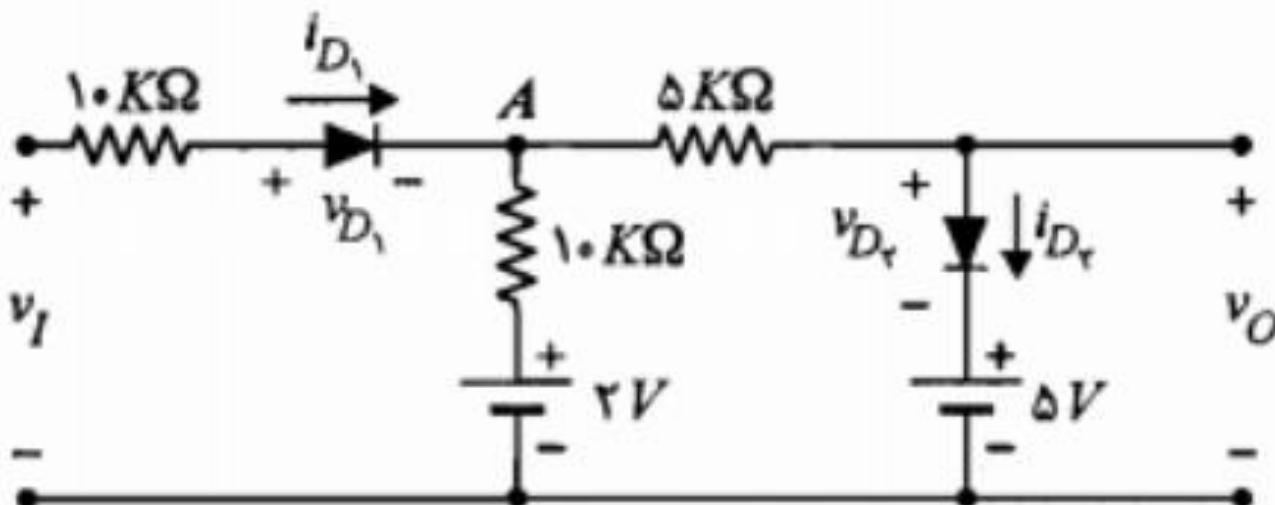


شکل ۳-۱۸: نحوه به دست آوردن شکل موج خروجی مدار برش با استفاده از شکل موج ورودی و مشخصه انتقالی آن

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیویدی

مدارات پرش دهنده؛ مثال

مثال ۳-۲۵: در مدار شکل ۳-۲۵ با فرض ابده آل بودن دیودها، مشخصه انتقالی را محاسبه و رسم کنید.



شکل ۳-۲۵: مدار مثال ۳-۲

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی

مدارات پرشی ۲۵-۳: ادامه مثال

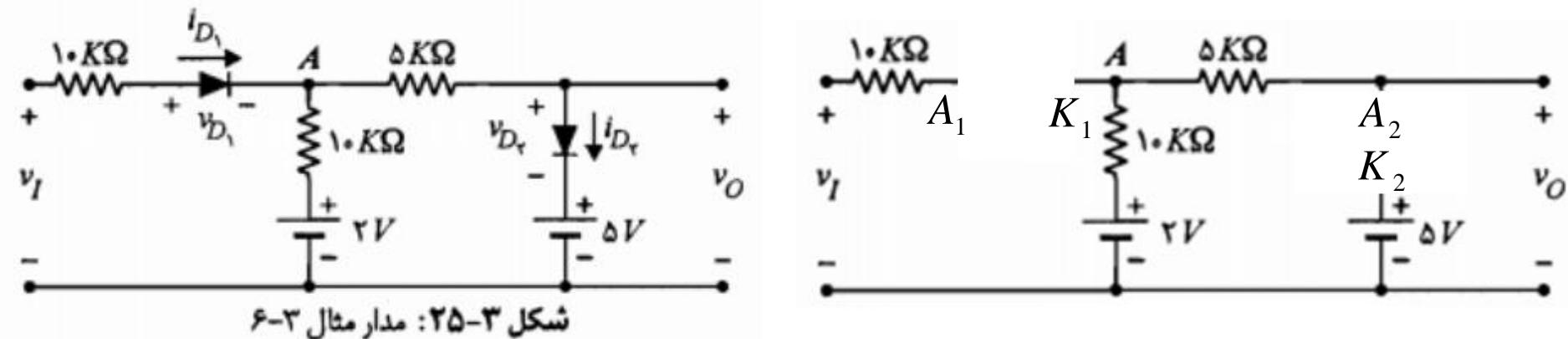
حالت اول: هر دو دیود خاموش

$v_O = 2V$ بوده و برای یافتن شرایط لازم، باید منطقی بودن ولتاژ دیودها بررسی شوند. از آنجا که در این وضعیت هیچ جریانی در مدار برقرار نیست؛ داریم

$$v_{D_1} = v_I - v_O \leq 0 \Rightarrow v_I \leq 2V$$

$$v_{D_2} = v_O - 0 = -4 < 0$$

با توجه به برقرار بودن شرط دوم، تنها شرط لازم در این حالت $v_I \leq 2V$ است.



تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی

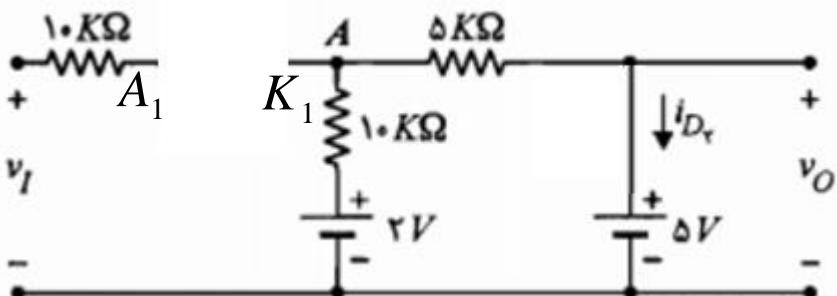
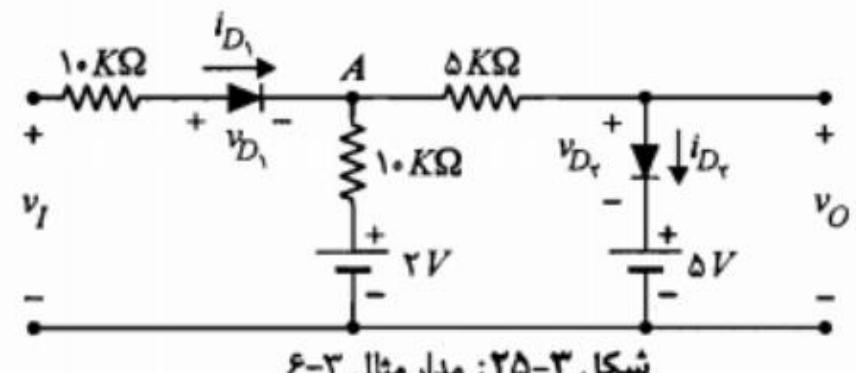
مدارات پرش ۵۰۵۰: ادامه مثال

حالت دوم: دیود D1 خاموش و دیود D2 روشن

- حالت درم: حال دیود D_1 را قطع و دیود D_2 را وصل در نظر می‌گیریم. اگرچه به طور کیفی و بدون محاسبه، امکانپذیر نبودن این فرض واضح است، اما از نظر مداری نیز داریم

$$i_{D_2} = \frac{2 - 0}{10 + 0} = +0.2 \text{ mA} < 0$$

که به طور آشکار با وصل بودن دیود D_2 منافات دارد و لذا چنین وضعیتی امکانپذیر نیست.



تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی مدارات پرش دهنده: ادامه مثال

حالت سوم: دیود D1 روشن و دیود D2 خاموش

- حالت سوم: در این وضعیت دیود D_1 را وصل و D_2 را قطع در نظر می‌گیریم. در این صریحت با استفاده از جمع آثار داریم

$$v_O = \frac{v_I}{1 + 1} \times 1 + \frac{2}{1 + 1} \times 1 = \frac{1}{2}v_I + 1$$

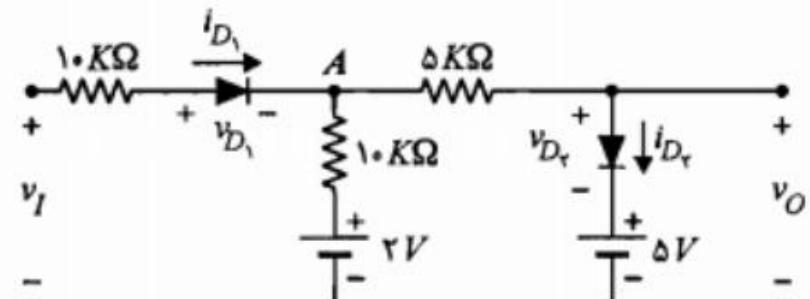
اما شرایط لازم برای این وضعیت عبارتست از

$$i_{D_1} = \frac{v_I - v_O}{1} = \frac{1}{1}v_I - \frac{1}{1} \geq 0 \Rightarrow v_I \geq 2$$

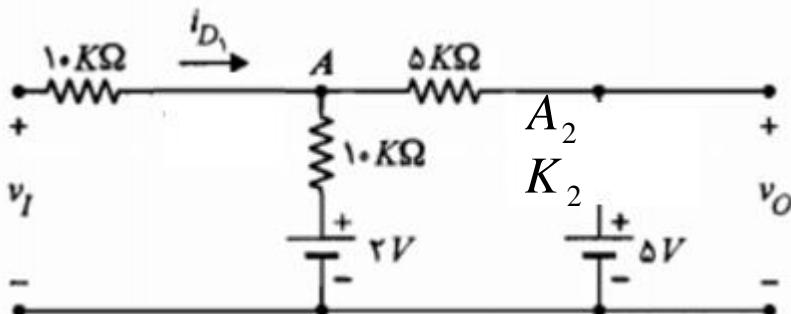
$$v_{D_2} = v_O - 5 = \frac{1}{2}v_I - 4 \leq 0 \Rightarrow v_I \leq 8$$

بنابراین

$$2 \leq v_I \leq 8 \Rightarrow v_O = \frac{1}{2}v_I + 1$$



شکل ۳-۲۵: مدار مثال



تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی

مدارات پرش دهنده: ادامه مثال

حالت چهارم: هر دو دیود روش

- حالت چهارم: در آخرین حالت هر دو دیود را وصل در نظر می‌گیریم. در این صرارت

$v_A = 5V$ است و از معادله KCL در گره A داریم

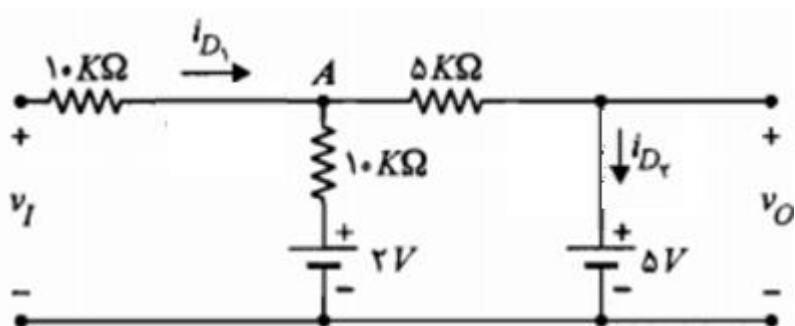
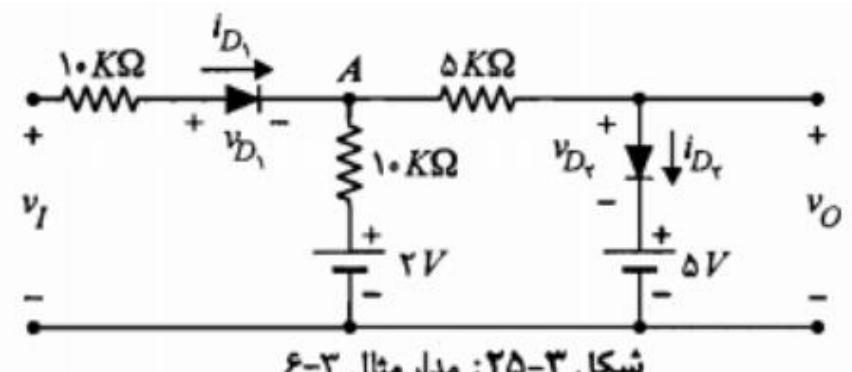
$$\frac{v_I - v_A}{1\Omega} - \frac{v_A - 2}{1\Omega} - \frac{v_A - 5}{5\Omega} = 0 \Rightarrow v_A = \frac{1}{4}v_I + 3$$

$$i_{D_1} = \frac{v_I - v_A}{1\Omega} = \frac{2v_I - 12}{4\Omega} \geq 0 \Rightarrow v_I \geq 6$$

$$i_{D_2} = \frac{v_A - 5}{5\Omega} = \frac{v_I - 8}{20\Omega} \geq 0 \Rightarrow v_I \geq 8$$

و چون هر دو شرط فوق باید همزمان برقرار باشند، داریم

$$v_I \geq 8 \Rightarrow v_O = 5$$



شکل ۲۵-۳: مدار مثال

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی

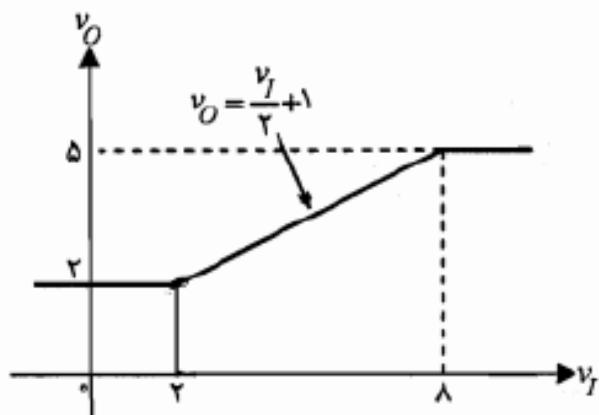
مدارات پرش دهنده

جدول تمام حالت‌های ممکن:

جدول ۲-۳ نمایانگر وضعیت‌های مسکن برای مدار بوده و مشخصه انتقالی مدار به صورت شکل ۲۶-۳ است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مشخصه انتقالی دارای دو نقطه شکست است. معنراً در مشخصه انتقالی به تعداد دیودهای موجود در مدار نقطه شکست خواهیم داشت.

جدول ۳-۳: وضعیت دیودها، ولتاژ ورودی و ولتاژ خروجی در مثال ۳-۶

| ولتاژ خروجی v_o | ولتاژ ورودی v_i | دیود D_2 | دیود D_1 |
|---------------------------|--------------------|------------|------------|
| $v_o = 2V$ | $v_i < 2V$ | قطع | قطع |
| $v_o = \frac{v_i}{2} + 1$ | $2V \leq v_i < 8V$ | قطع | وصل |
| $v_o = 5V$ | $8V < v_i$ | وصل | وصل |

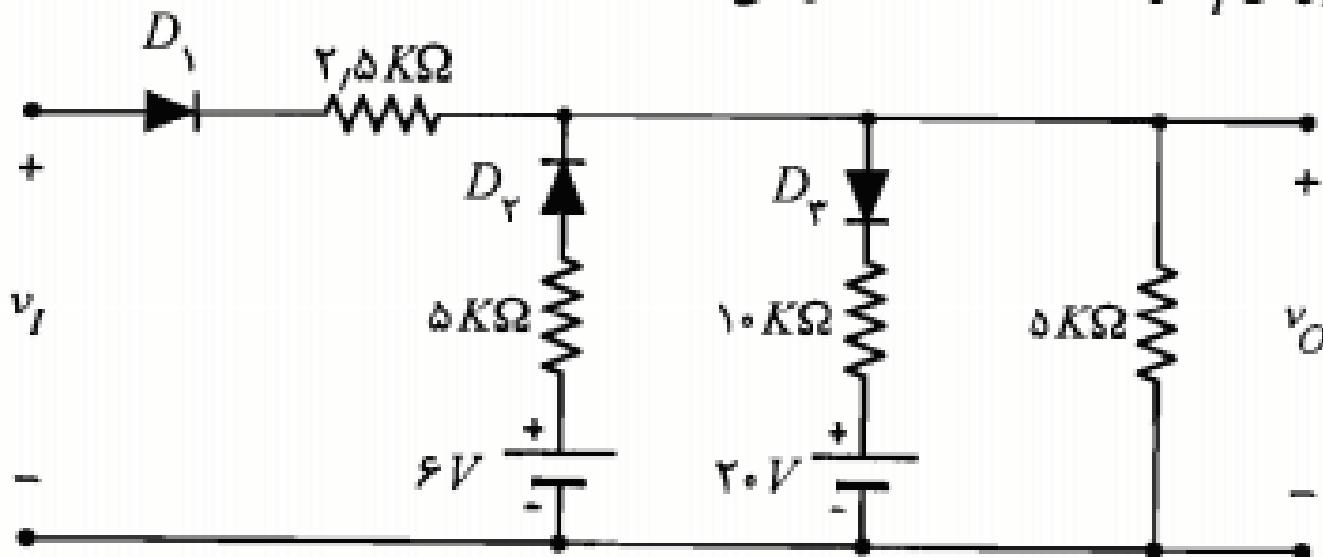


شکل ۳-۲۶: مشخصه انتقالی مدار مثال ۳-۶

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیویدی مدارات پرش دهنده :۵

تمرین: (به عهد دانشجو)

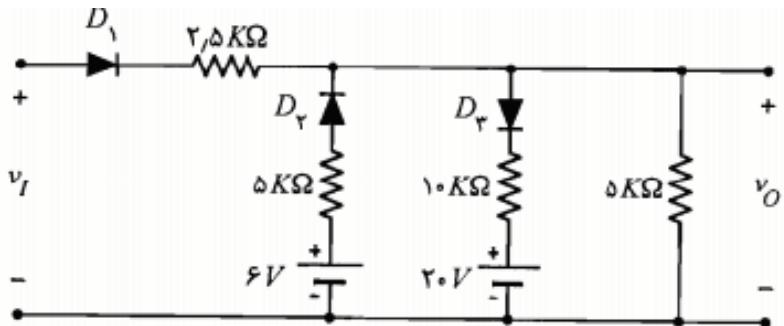
در مدار شکل م-۲۳، با فرض ایده‌آل بودن دیوردها، مشخصه انتقالی را به دست آورده و رسم نمایید. ورودی v_i از ۰ تا ۵ ولت تغییر می‌کند.



شکل م-۲۳

۱۵۱م تمرین (به عهده دانشجو)

حالت اول: هر سه دیود خاموش: تناقض

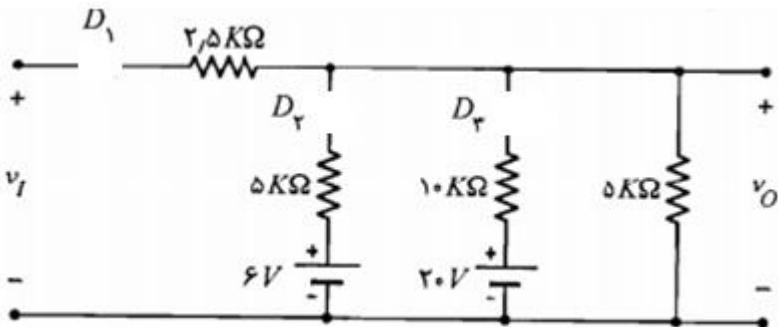


$$v_O = 0$$

$$D_1 : V_A < V_K \rightarrow v_I < v_O = v_I < 0$$

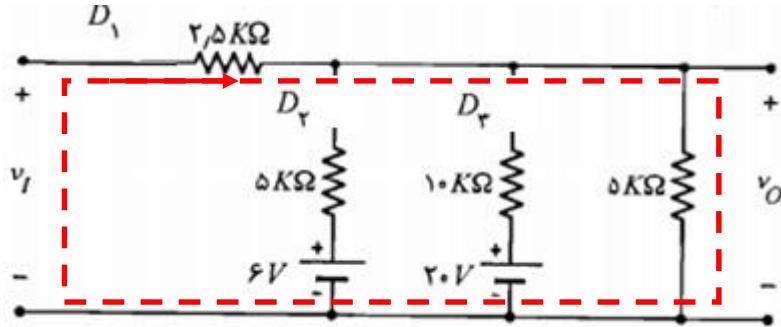
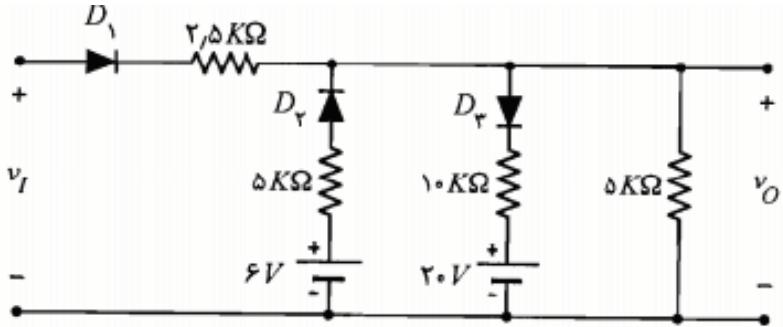
$$D_2 : V_A < V_K \rightarrow 6 < v_O = 6 < 0 \times$$

$$D_3 : V_A < V_K \rightarrow v_O < 20 = 0 < 20$$



اداوه تمرین (به عهده دانشجو)

حالت دوم: دیود D1 روشن و دو دیود دیگر خاموش

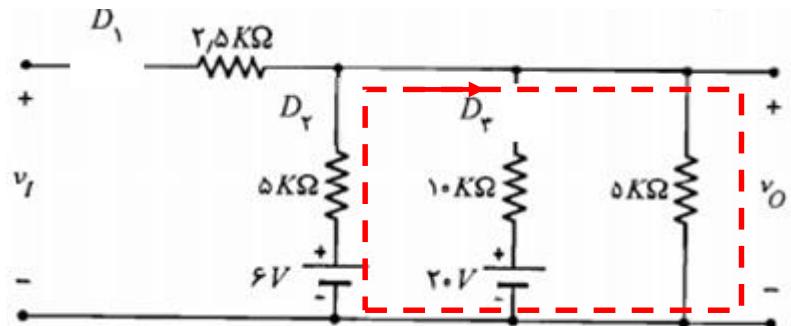
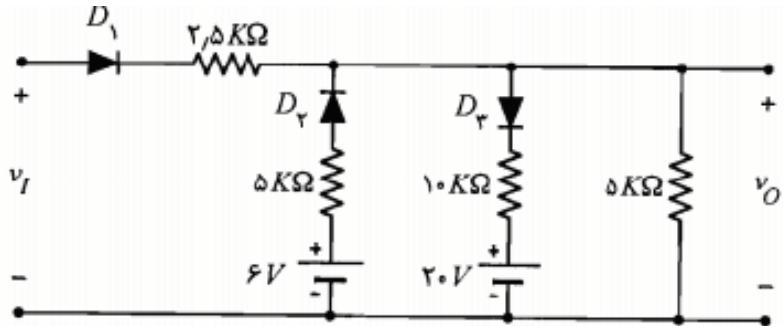


$$KVL: -v_I + 2.5i_{D1} + 5i_{D1} = 0 \rightarrow i_{D1} = \frac{v_I}{7.5}, v_O = 5i_{D1} = \frac{2}{3}v_I$$

$$\begin{cases} D_1: i_{D1} > 0 \rightarrow \frac{v_I - v_O}{2.5} > 0 \rightarrow v_I > \frac{2}{3}v_O \rightarrow v_I > 0 \\ D_2: V_A < V_K \rightarrow 6 < \frac{2}{3}v_I \rightarrow v_I > 9 \\ D_3: V_A < V_K \rightarrow v_O < 20 = \frac{2}{3}v_I < 20 \rightarrow v_I < 30 \end{cases} \rightarrow 9 < v_I < 30, v_O = \frac{2}{3}v_I$$

اولین تمرین (به عهدہ دانشجو)

حال سوم: دیود D2 روشن و دو دیود دیگر خاموش

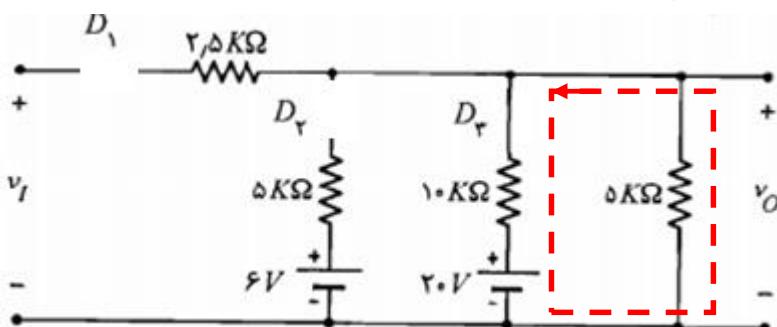
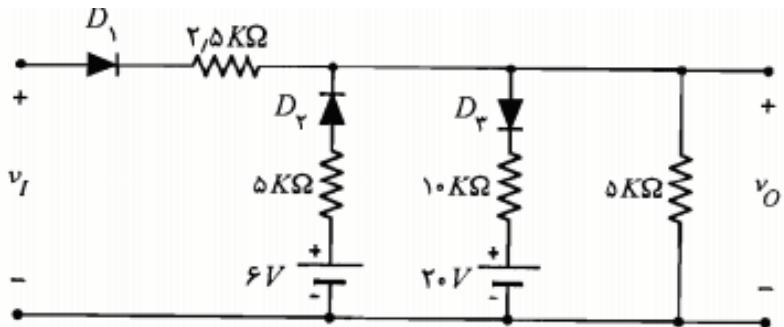


$$KVL: -6 + 5i_{D2} + 5i_{D2} = 0 \rightarrow i_{D2} = 0.6mA, v_O = 5i_{D2} = 3$$

$$\begin{cases} D_1: V_A < V_K \rightarrow v_I < v_O = v_I < 3 \\ D_2: i_{D2} > 0 \rightarrow 0.6mA > 0 \rightarrow v_I < 3, v_O = 3 \\ D_3: V_A < V_K \rightarrow v_O < 20 = 3 < 20 \end{cases}$$

اداوه تمرین (به عهده دانشجو)

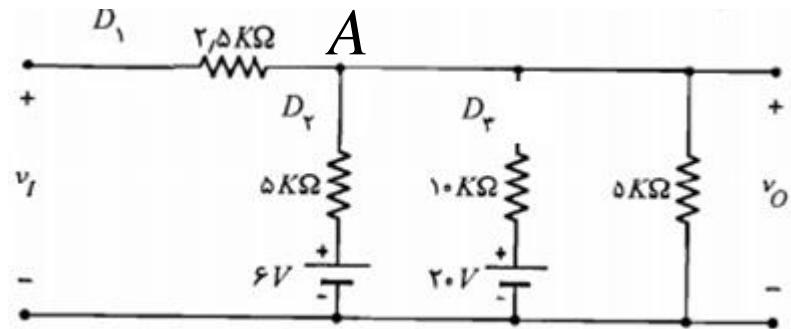
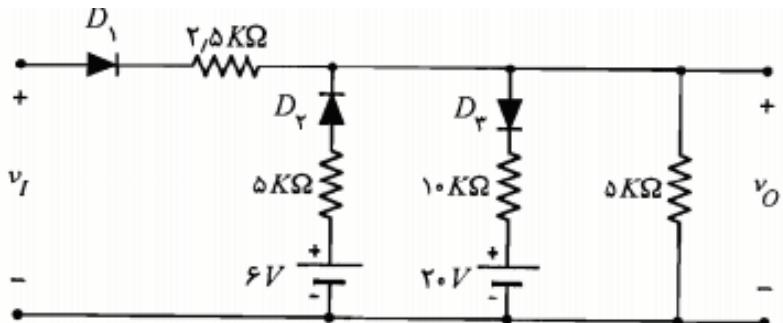
حالت چهارم: دیود D₃ روشن و دو دیود دیگر خاموش: تناقض



$$KVL: 20 + 10i_{D3} + 5i_{D3} = 0 \rightarrow i_{D3} = -1.33mA \times$$

اداوه تمرین (به عهده دانشجو)

حالت پنجم: دیود D1 و D2 روشن و دیود D3 خاموش

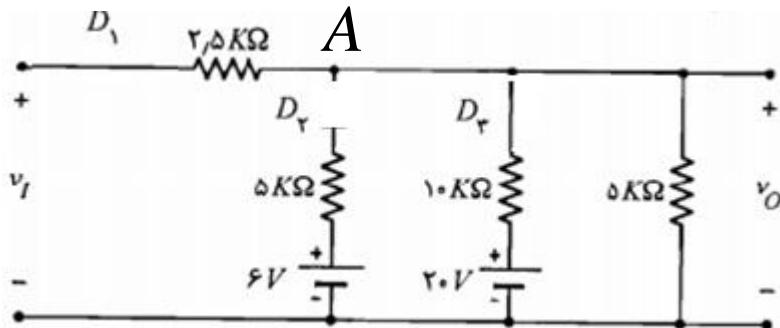
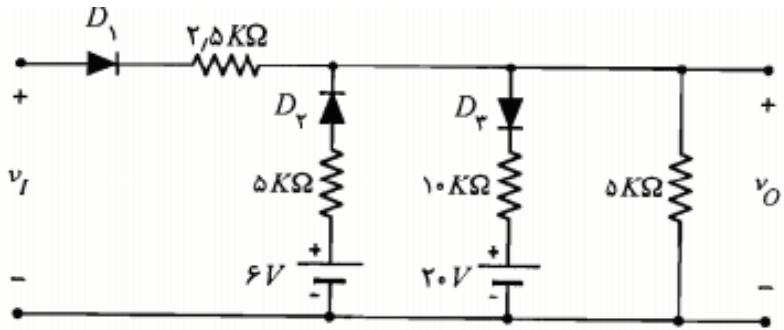


$$KCL \text{ at } A: \frac{v_I - v_O}{2.5} + \frac{6 - v_O}{5} = \frac{v_O}{5} \rightarrow v_O = \frac{1}{2}v_I + \frac{3}{2}$$

$$\begin{cases} D_1: i_{D1} > 0 \rightarrow \frac{v_I - v_O}{2.5} > 0 \rightarrow v_I > \frac{1}{2}v_I + \frac{3}{2} \rightarrow v_I > 3 \\ D_2: i_{D2} > 0 \rightarrow \frac{6 - v_O}{5} > 0 \rightarrow 6 > \left(\frac{1}{2}v_I + \frac{3}{2} \right) \rightarrow v_I < 9 \rightarrow 3 < v_I < 9, v_O = \frac{1}{2}v_I + \frac{3}{2} \\ D_3: V_A < V_K \rightarrow \frac{1}{2}v_I + \frac{3}{2} < 20 \rightarrow v_I < 37 \end{cases}$$

۱۵۱م تمرین (به عهد دانشجو)

حالت ششم: دیود D1 و D3 روشن و دیود D2 خاموش

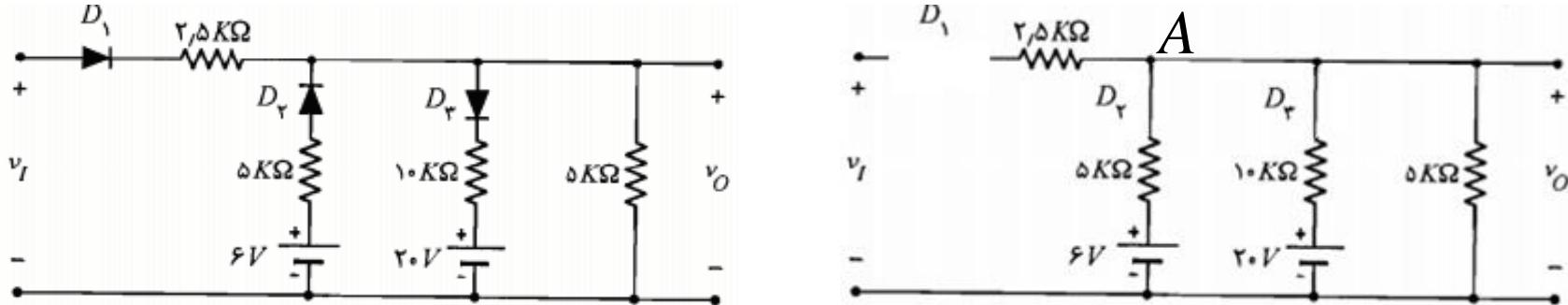


$$KCL \text{ at } A: \frac{v_I - v_O}{2.5} = \frac{v_O - 20}{10} + \frac{v_O}{5} \rightarrow v_O = \frac{4v_I + 20}{7}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} D_1: i_{D1} > 0 \rightarrow \frac{v_I - v_O}{2.5} > 0 \rightarrow v_I - \left(\frac{4v_I + 20}{7} \right) > 0 \rightarrow v_I > \frac{20}{3} \\ D_2: V_A < V_K \rightarrow 6 < v_O \rightarrow 6 < \frac{4v_I + 20}{7} \rightarrow v_I > \frac{22}{4} \rightarrow v_I > 30, v_O = \frac{4v_I + 20}{7} \\ D_3: i_{D3} > 0 \rightarrow \frac{v_O - 20}{10} > 0 \rightarrow \frac{4v_I + 20}{7} > 20 \rightarrow v_I > 30 \end{array} \right.$$

اداوه تمرین (به عهد دانشجو)

حالت هفتم: دیود D2 و دیود D3 روشن و دیود D1 خاموش: تناقض

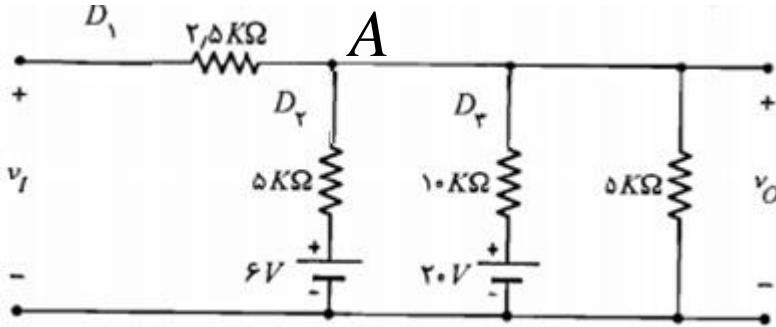
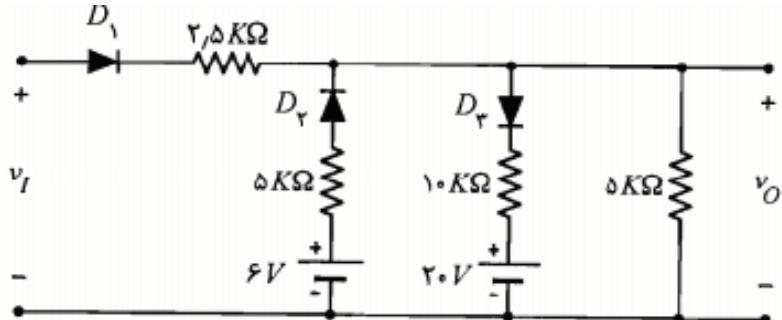


$$KCL A: \frac{6 - v_o}{5} = \frac{v_o - 20}{10} + \frac{v_o}{5} \rightarrow v_o = 6.4$$

$$\left\{ \begin{array}{l} D_1: V_A < V_K \rightarrow v_I < v_o \rightarrow v_I < 6.4 \\ D_2: i_{D2} > 0 \rightarrow \frac{6 - v_o}{5} > 0 \rightarrow v_o < 6 = 6.4 < 6 \times \\ D_3: i_{D3} > 0 \rightarrow \frac{v_o - 20}{10} > 0 \rightarrow \frac{6.4 - 20}{10} > 0 \times \end{array} \right.$$

۱۵۱م تمرین (به عهده دانشجو)

حالت هشتم: هر سه دیود روش: تناقض



$$KCL \text{ at } A: \frac{v_I - v_O}{2.5} + \frac{6 - v_O}{5} = \frac{v_O - 20}{10} + \frac{v_O}{5} \rightarrow v_O = \frac{4v_I + 32}{9}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} D_1: i_{D1} > 0 \rightarrow \frac{v_I - v_O}{2.5} > 0 \rightarrow v_I > \frac{4v_I + 32}{9} \rightarrow v_I > 6.4 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} D_2: i_{D2} > 0 \rightarrow \frac{6 - v_O}{5} > 0 \rightarrow v_O < 6 = \frac{4v_I + 32}{9} < 6 \rightarrow v_I < 8 \rightarrow \emptyset \rightarrow \times \end{array} \right.$$

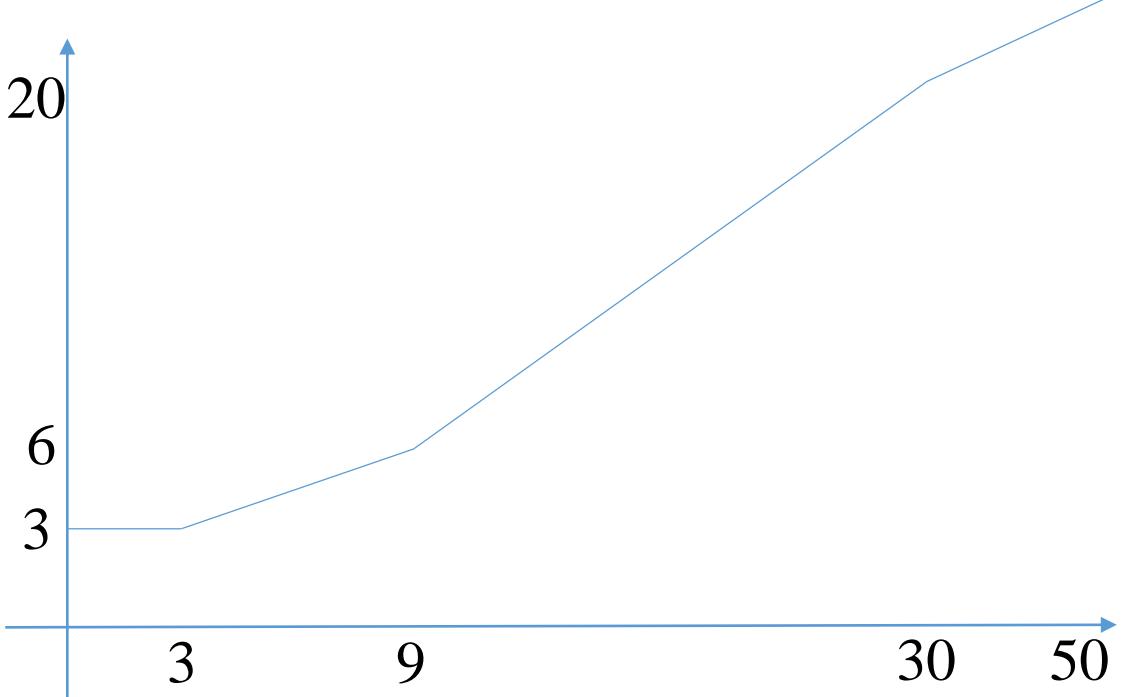
$$\left\{ \begin{array}{l} D_3: i_{D3} > 0 \rightarrow \frac{v_O - 20}{10} > 0 \rightarrow \frac{4v_I + 32}{9} > 20 \rightarrow v_I > 37 \end{array} \right.$$

ادامه تمرین (به عهده دانشجو)

جمع بندی

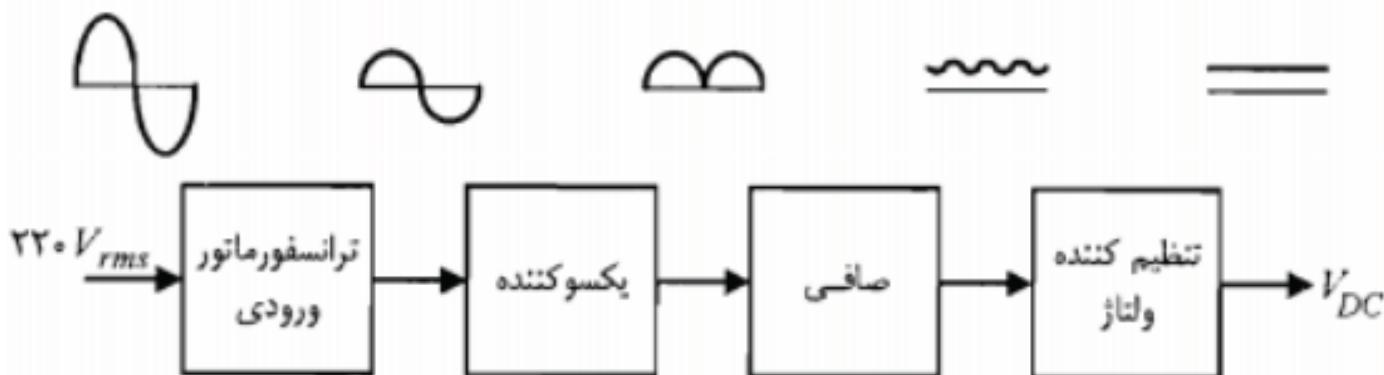
ادامه حل تمرین

$$v_o = \begin{cases} 3 & v_I < 3 \\ \frac{1}{2}v_I + \frac{3}{2} & 3 < v_I < 9 \\ \frac{2}{3}v_I & 9 < v_I < 30 \\ \frac{4v_I + 20}{7} & 30 < v_I < 50 \end{cases}$$



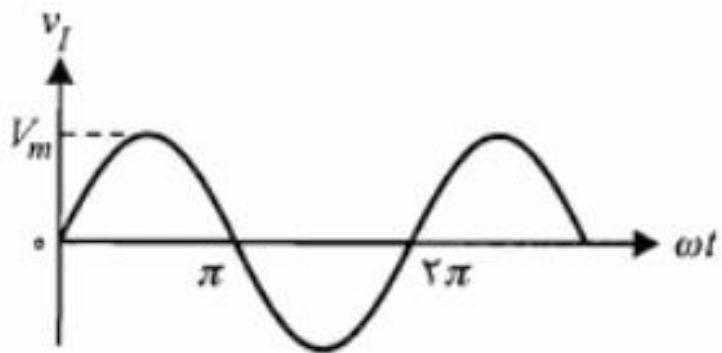
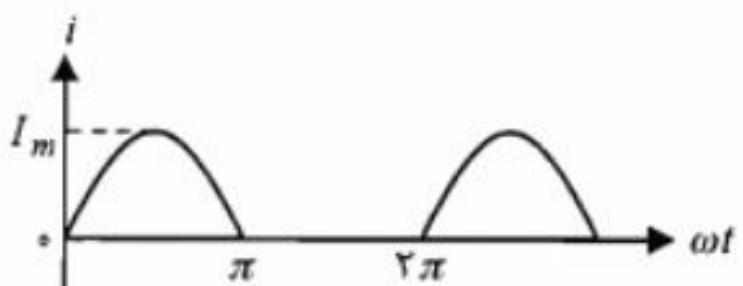
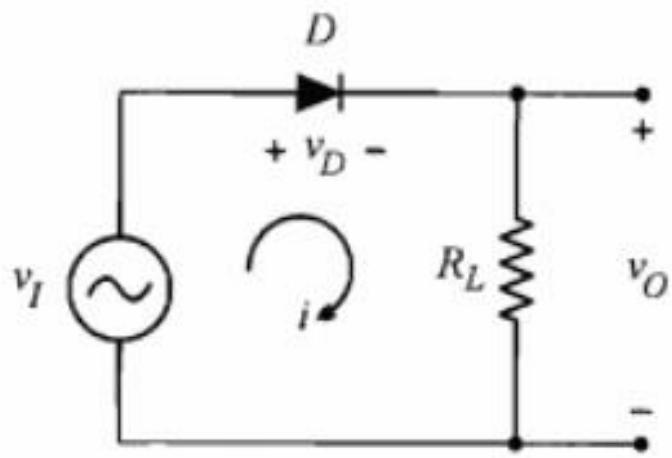
تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی مدارات یکسوکننده و صافی

تقریباً در تمامی دستگاههای الکترونیکی که با برق شهر کار می‌کنند، بخشی به نام منبع تغذیه در داخل و یا در کنار آن وجود دارد که ولتاژ 220 ولت متناوب برق شهر را به یک یا چند ولتاژ DC مورد نیاز آن دستگاه تبدیل می‌کند. در یک منبع تغذیه ابتدا توسط یک ترانسفورماتور، ولتاژ 220 ولت را به ولتاژهای مورد نیاز تبدیل نموده و سپس آن را یکسو می‌نمایند. ولتاژ یکسو شده را پس از عبور از صافی به تنظیم کننده ولتاژ می‌دهند. خروجی تنظیم کننده یک ولتاژ DC با درصد تغییرات قابل قبول است. در شکل ۲۷-۳۰ بلوک دیاگرام یک منبع تغذیه نمایش داده شده است.



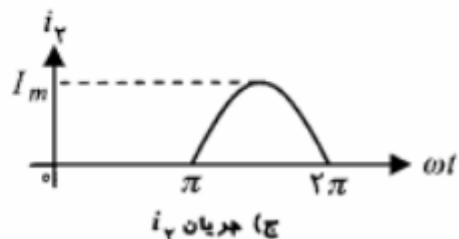
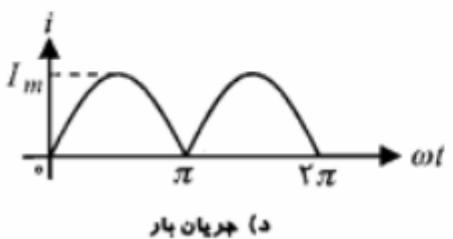
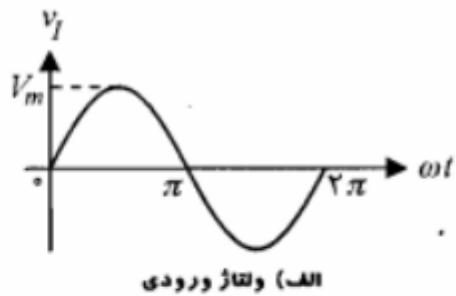
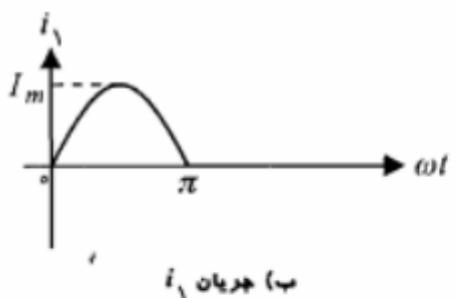
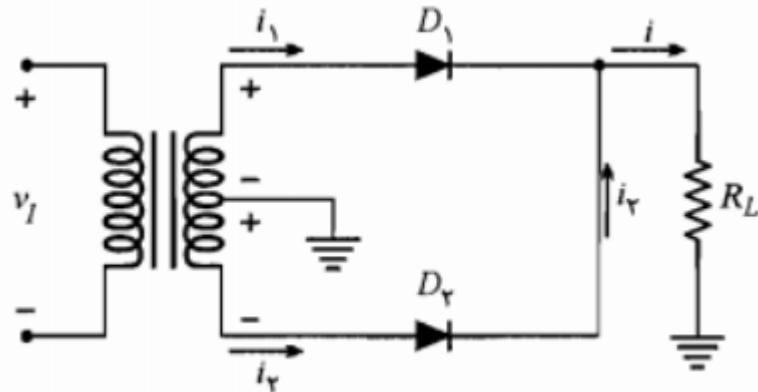
شکل ۲۷-۳۰: بلوک دیاگرام یک منبع تغذیه

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی مدارات یکسوندۀ نیم موج



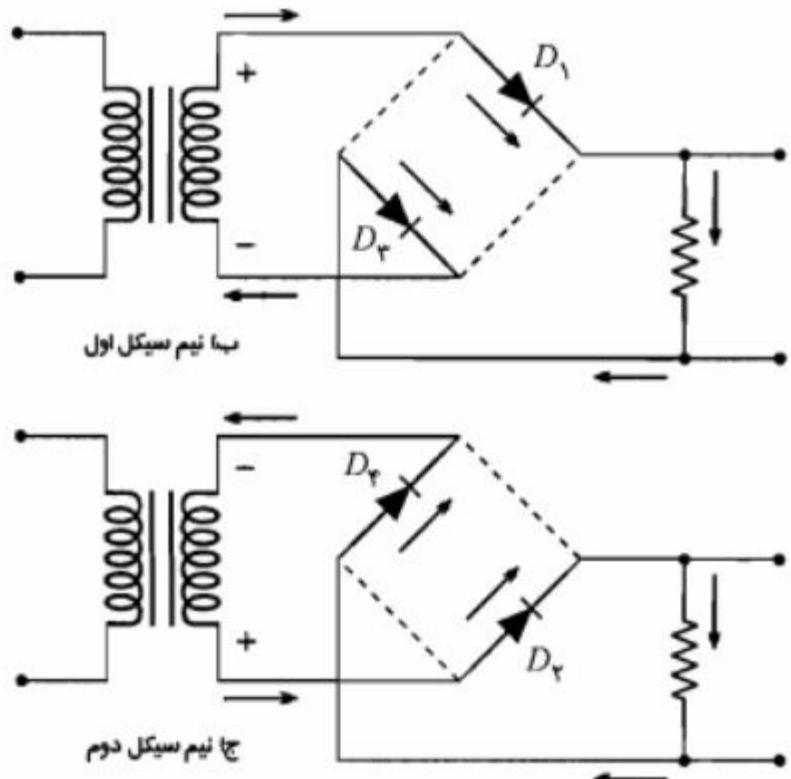
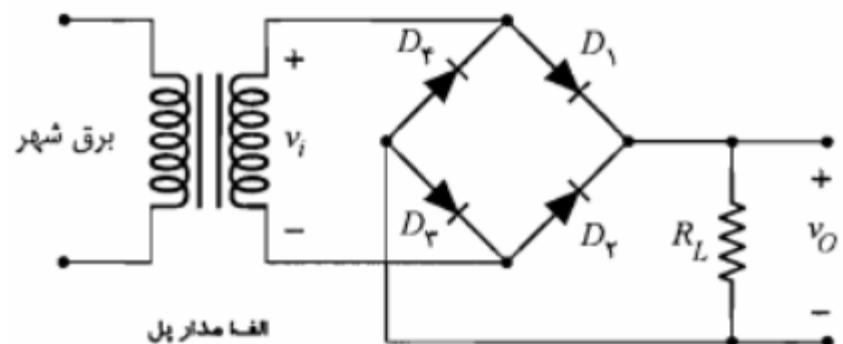
شکل ۲۸-۳: یکسوندۀ نیم موج

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی مدارات یکسوکننده تمام موج



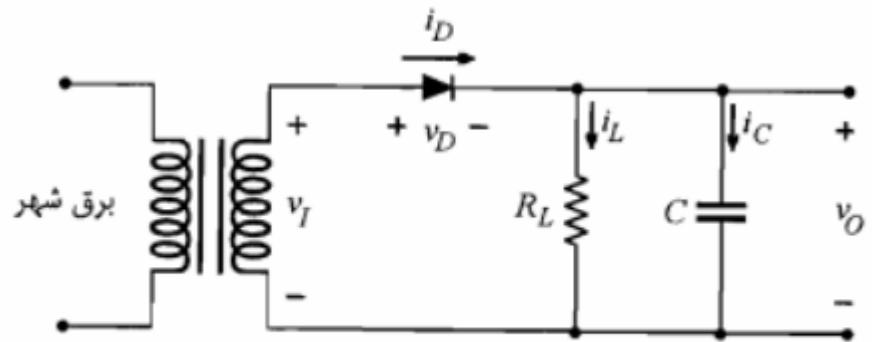
شکل ۳۲-۳: شکل موجهای یکسوکننده تمام موج

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی مدارات یکسوکننده تمام موج پال دیودی

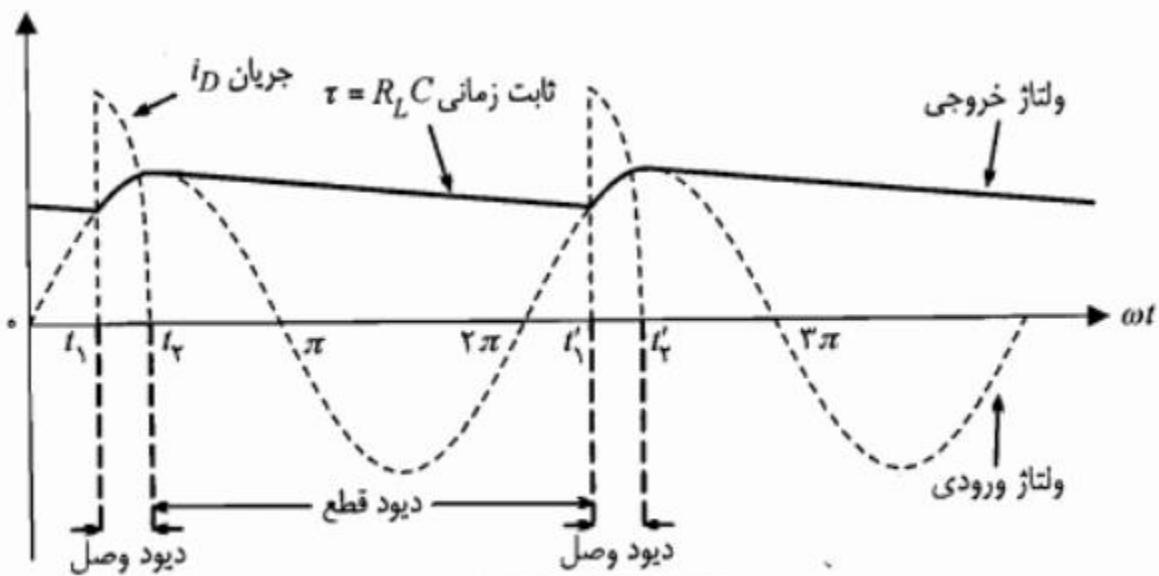


شکل ۳۳-۳: یکسوکننده پال

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی صافی خازنی برای یکسوکننده نیم موج

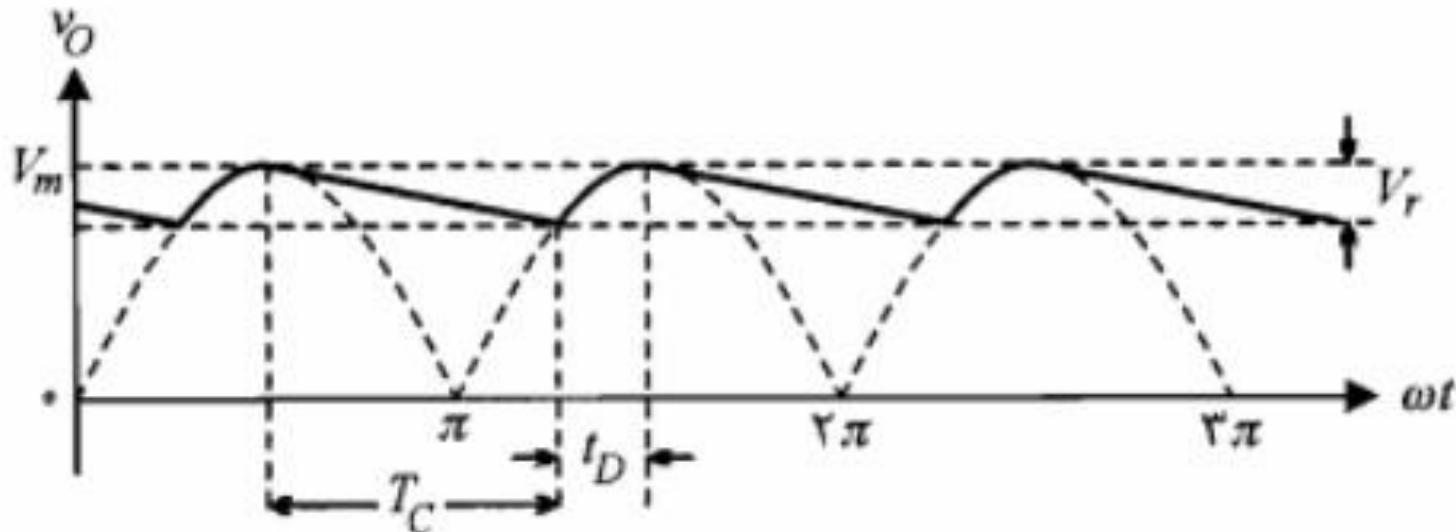


شکل ۳-۳۴: یکسوکننده نیم موج با صافی خازنی ساده



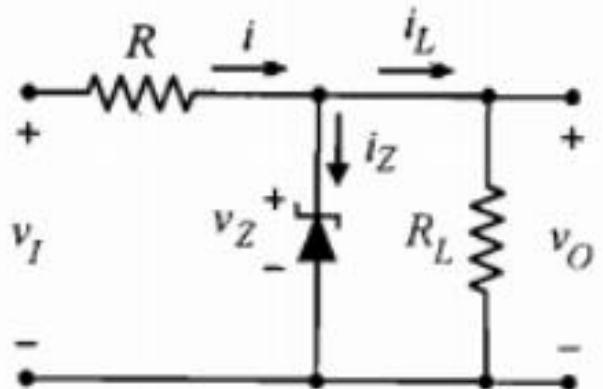
شکل ۳-۳۶: شکل موجهای ولتاژهای ورودی، خروجی و جریان دیود در مدار شکل ۳-۳۴.

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی صافی خازنی برای یکسوگنده تمام موج



شکل ۳-۳۷: ولتاژ خروجی یکسوگنده تمام موج با صافی خازنی

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی تنظیم کننده ولتاژ با استفاده از دیود زنر



$$i = \frac{v_I - V_Z}{R} = \text{ثابت}$$

و چون $i_L = i - i_Z = i - I_{Z,max}$ است، بنابراین حداقل i_L متناظر با حداکثر i_Z یعنی $I_{Z,max}$ خواهد بود. یا

$$i_{L,min} = i - I_{Z,max} = \frac{v_I - V_Z}{R} - I_{Z,max} \quad (43-3)$$

و همچنین برای مقدار حداکثر جریان i_L خواهیم داشت

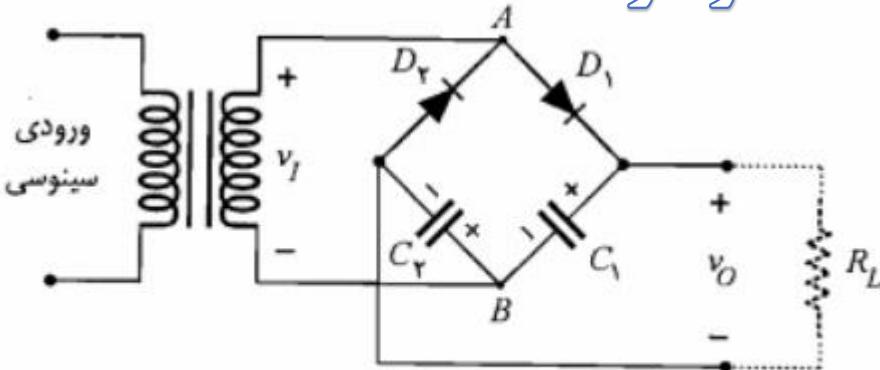
$$i_{L,max} = i - I_K = \frac{v_I - V_Z}{R} - I_K \quad (44-3)$$

اما برای ثابتی ولتاژ خروجی ($v_O = V_Z$) لازم است مقادیر حداقل و حداکثر مقاومت R_L در روابط زیر صدق کنند:

$$R_{L,min} = \frac{V_Z}{i_{L,max}} \quad (45-3)$$

$$R_{L,max} = \frac{V_Z}{i_{L,min}} \quad (46-3)$$

تجزیه و تحلیل و گاربردهای مدارهای دیودی مدار ۲ برابر کننده ولتاژ

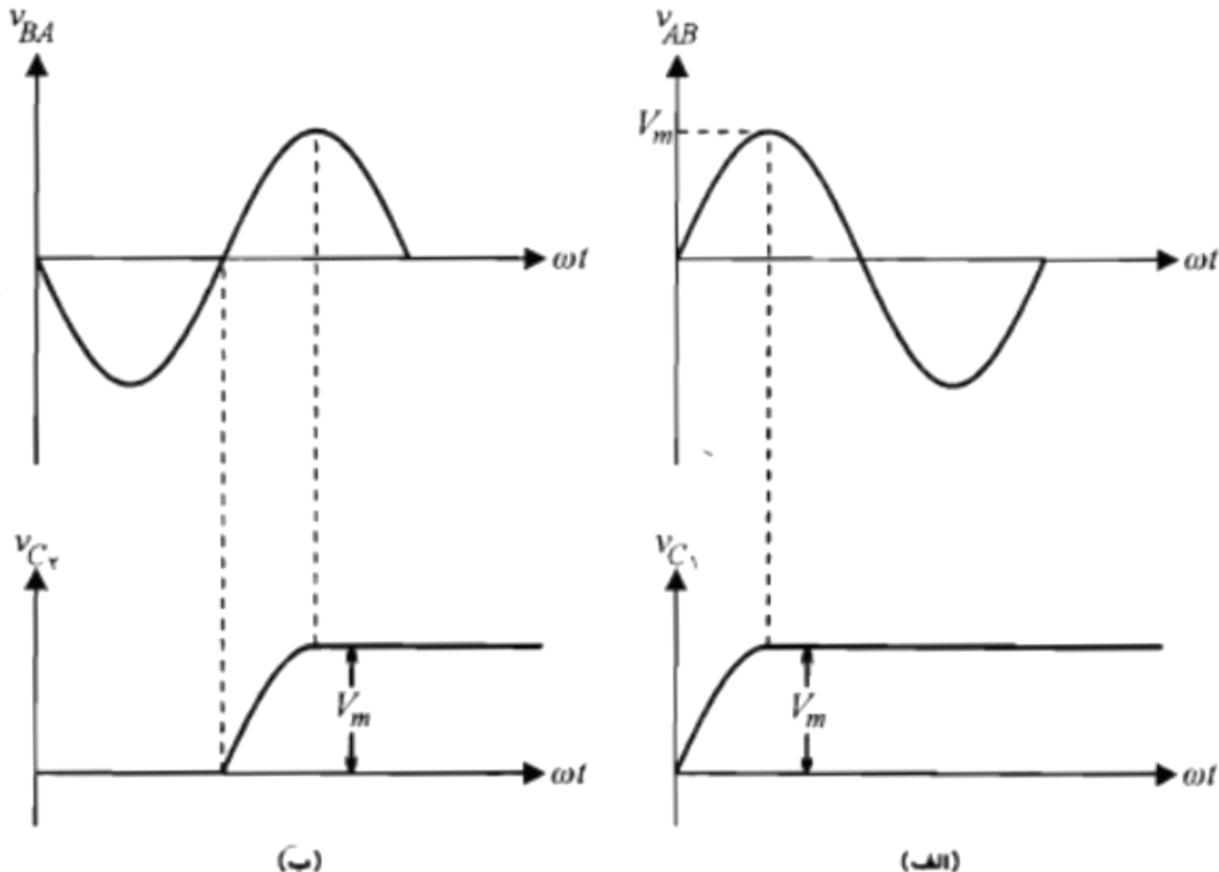


شکل ۳۹-۳: مدار دو برابر کننده ولتاژ

در این مدار در ربع سیکل اول که ولتاژ v_{AB} مثبت است دیود D_1 هدایت نموده و دیود D_2 قطع است و خازن C_1 از طریق دیود D_1 شروع به شارژ نموده و به اندازه V_m شارژ می‌شود. همین که ولتاژ ورودی حداکثر خود را پشت سر گذاشت ولتاژ دو سر دیود D_1 منفی شده و این دیود به حالت قطع می‌رود. با قطع دیود D_1 ولتاژ دو سر خازن C_1 ، که راهی برای تخلیه ندارد، ثابت باقی می‌ماند (شکل ۴۰-۳-الف). در نیم سیکل دوم، v_{AB} منفی و بنابراین v_{BA} مثبت خواهد بود (شکل ۴۰-۳-ب). با آغاز این نیم سیکل، دیود D_4 شروع به هدایت نموده و دیود D_3 همچنان قطع خواهد بود. این بار خازن C_2 تغییرات ولتاژ ورودی را دنبال نموده و به اندازه V_m شارژ می‌شود. با عبور v_{BA} از مقدار حداکثر V_m ، دیود D_4 قطع گردیده و ولتاژ خازن C_2 تغییر نمی‌کند. از این لحظه به بعد ولتاژ خروجی v_O که برابر مجموع ولتاژهای دو خازن C_1 و C_2 است ثابت و مساوی $2V_m$ باقی خواهد ماند.

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیودی

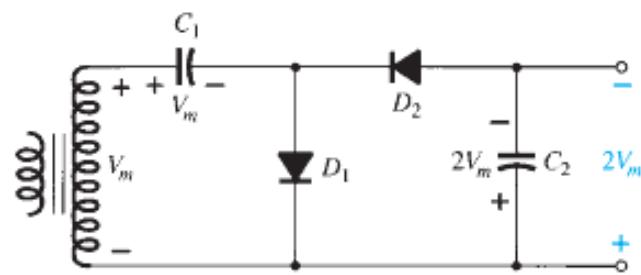
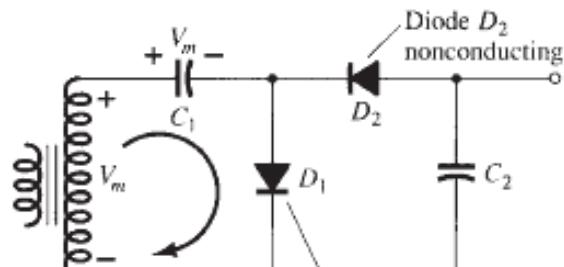
مدار ۲ برابر کننده ولتاژ



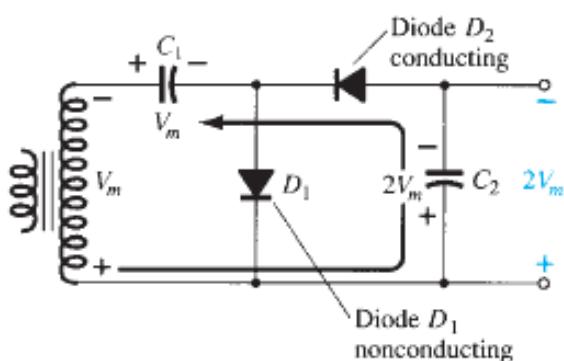
شکل ۳-۴۰: شکل موجهای مدار دو برابر کننده ولتاژ

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیویدی

مدار ۲ برابر کننده ولتاژ


FIG. 2.123
Half-wave voltage doubler.


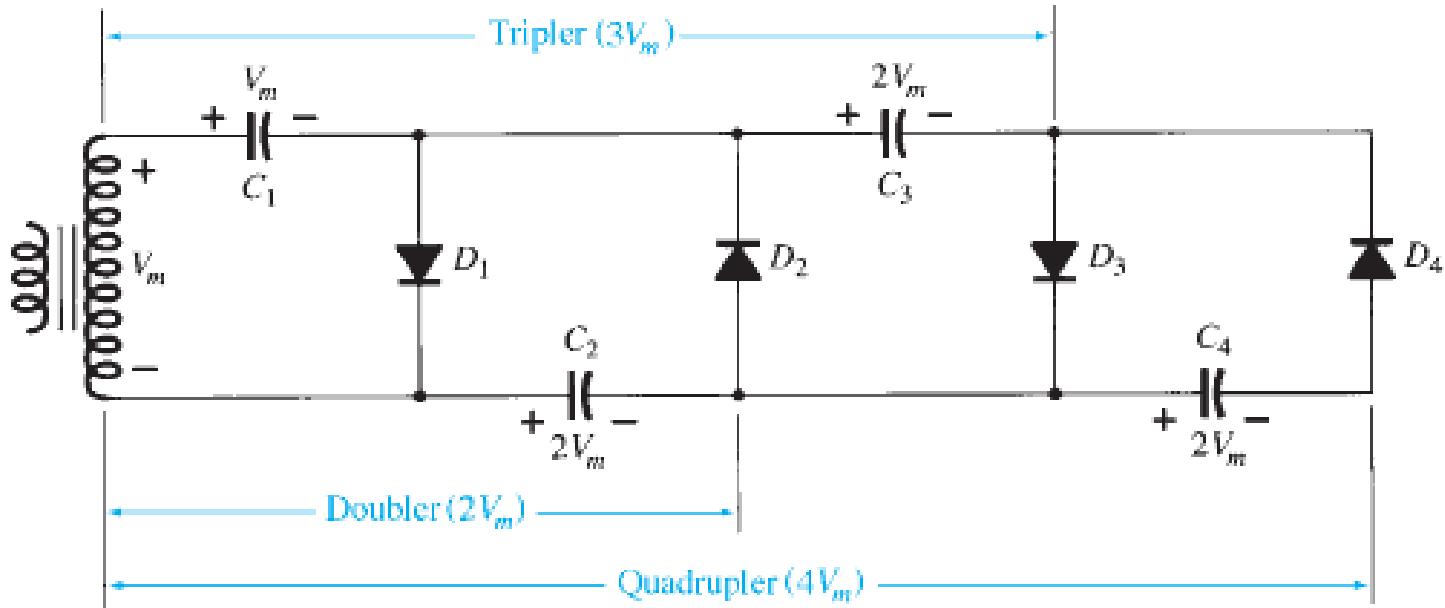
$$KVL \text{ Clockwise } D_1 : -V_m + V_{C_1} = 0 \rightarrow V_{C_1} = V_m$$



$$KVL \text{ antiClockwise } D_2 : -V_m + V_{C_2} - V_{C_1} = 0$$

$$\xrightarrow{V_{C_1}=V_m} V_{C_2} = V_m + V_m = 2V_m$$

تجزیه و تحلیل و کاربردهای مدارهای دیویدی تمرین: (به عهدہ دانشجو): مدار چندبرابر کننده ولتاژ



$$KVL \text{ Clockwise } D_1 : -V_m + V_{C_1} = 0 \rightarrow V_{C_1} = V_m$$

$$KVL \text{ antiClockwise } D_2 : -V_m + V_{C_2} - V_{C_1} = 0 \xrightarrow{V_{C_1}=V_m} V_{C_2} = V_m + V_m = 2V_m$$

$$KVL \text{ Clockwise } D_3 : -V_m + V_{C_1} + V_{C_3} - V_{C_2} = 0 \rightarrow V_{C_3} = V_m - V_{C_1} + V_{C_2} = V_m - V_m + 2V_m = 2V_m$$

$$KVL \text{ antiClockwise } D_4 : -V_m + V_{C_2} + V_{C_4} - V_{C_3} - V_{C_1} = 0 \rightarrow V_{C_4} = V_m - 2V_m + 2V_m + V_m = 2V_m$$