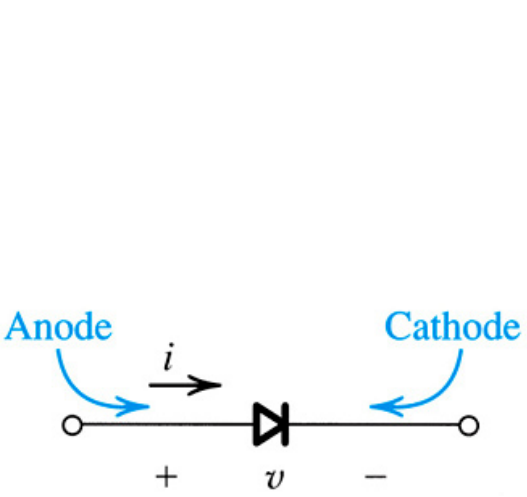
Fundamentals of Microelectronics

- CH1 Why Microelectronics?
- CH2 Basic Physics of Semiconductors
- CH3 Diode Circuits
- CH4 Physics of Bipolar Transistors
- CH5 Bipolar Amplifiers
- CH6 Physics of MOS Transistors
- CH7 CMOS Amplifiers
- CH8 JFET Transistor

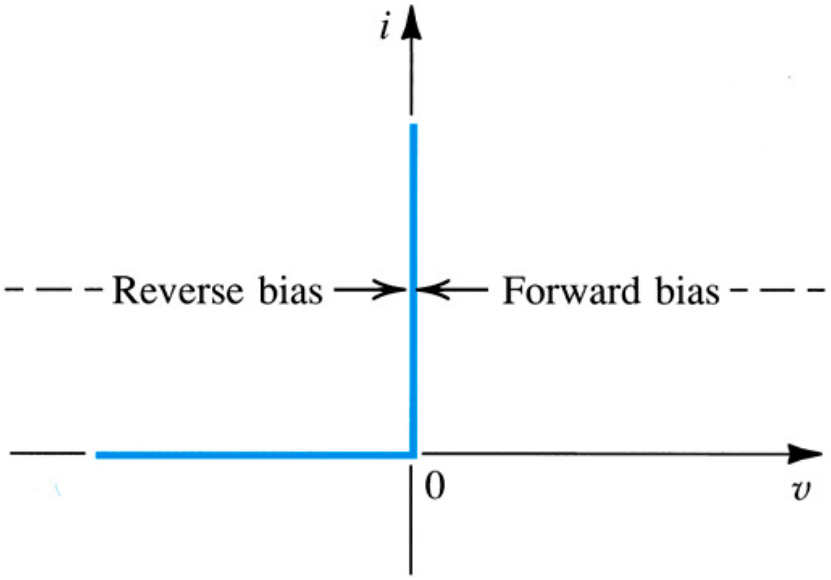
فصل سوم: مدارهای دیودی

- 3-1 دیود ایده آل
- 3-2 پیوند PN به عنوان دیود
- 3-3 کاربرد های دیود

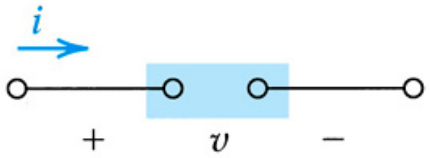
مشخصه جریان برحسب ولتاژ دیود ایده آل



(a)

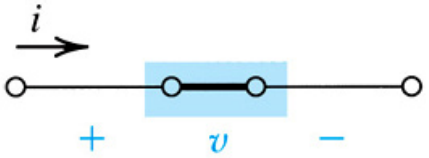


(b)



$v < 0 \Rightarrow i = 0$

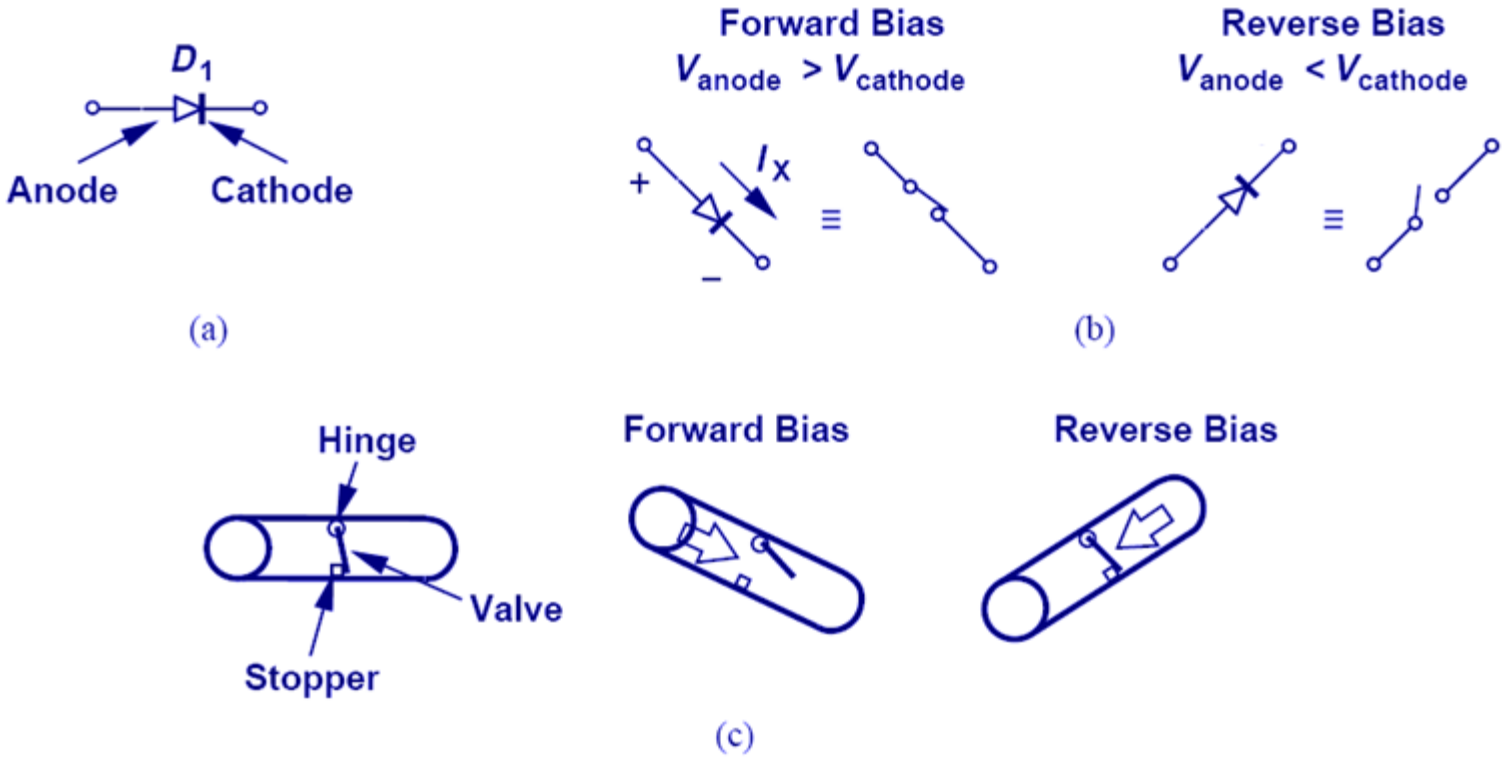
(c)



$i > 0 \Rightarrow v = 0$

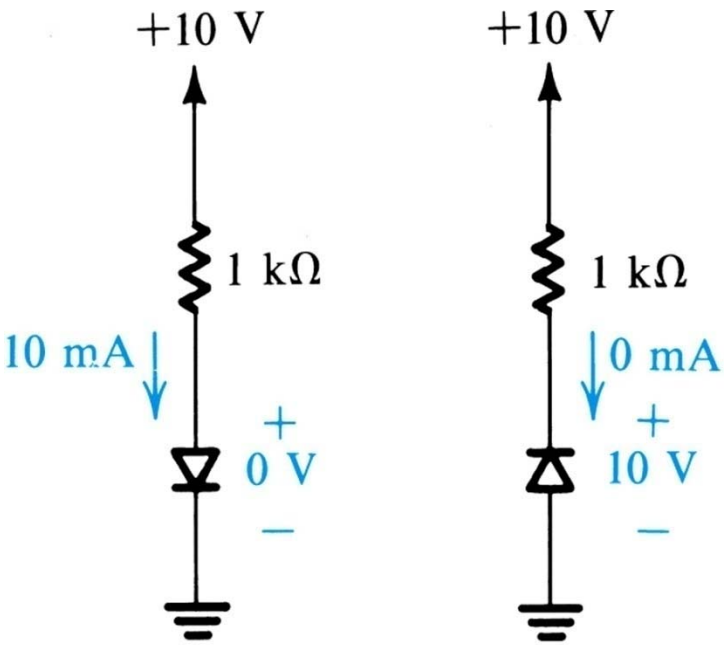
(d)

دیود ایده آل

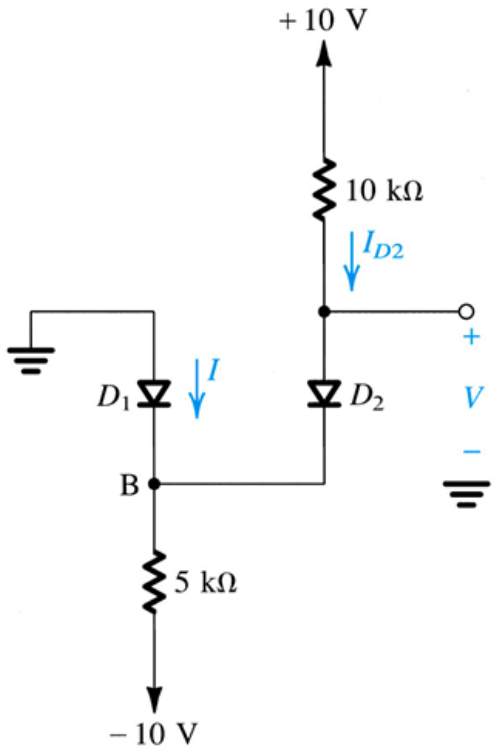


- در یک دیود ایده آل هرگاه ولتاژ دوسر دیود بخواهد از صفر ولت بیش تر شود در آن صورت دیود به صورت اتصال کوتاه عمل کرده و از آن جریان می گذرد.
- عملکرد دیود همانند لوله آبی است که اجازه عبور آب را تنها در یک جهت می دهد.

مثال 1



مثال 2

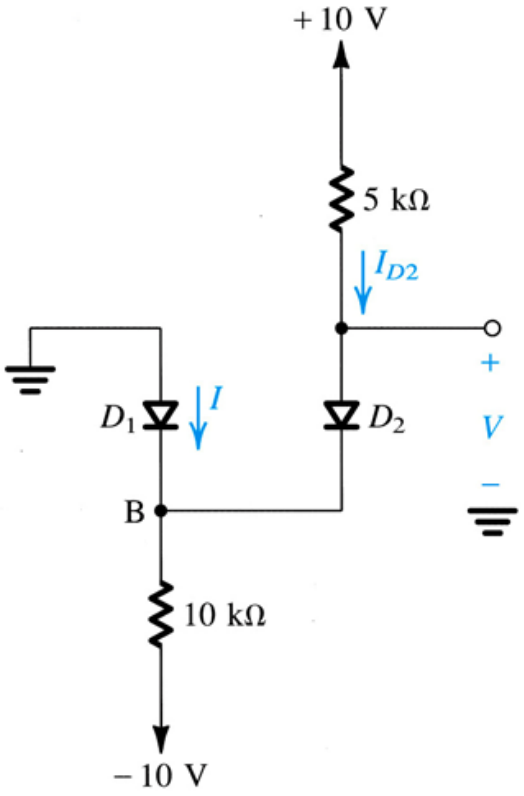


Assume : D1, D2 On

$V = 0$

$$\left.\begin{aligned} \mathrm{I_{D2}} &= \frac{10-0}{10k} = 1mA \\ I + \mathrm{I_{D2}} &= \frac{0-(-10)}{5k} = 2mA \end{aligned}\right\} \Rightarrow I = 1mA$$

مثال 3



Assume : D1, D2 On

$$V = 0$$

$$\left.\begin{aligned} I_{D2} &= \frac{10-0}{5k} = 2mA \\ I + I_{D2} &= \frac{0-(-10)}{1k} = 1mA \end{aligned}\right\} \Rightarrow I = -1mA$$

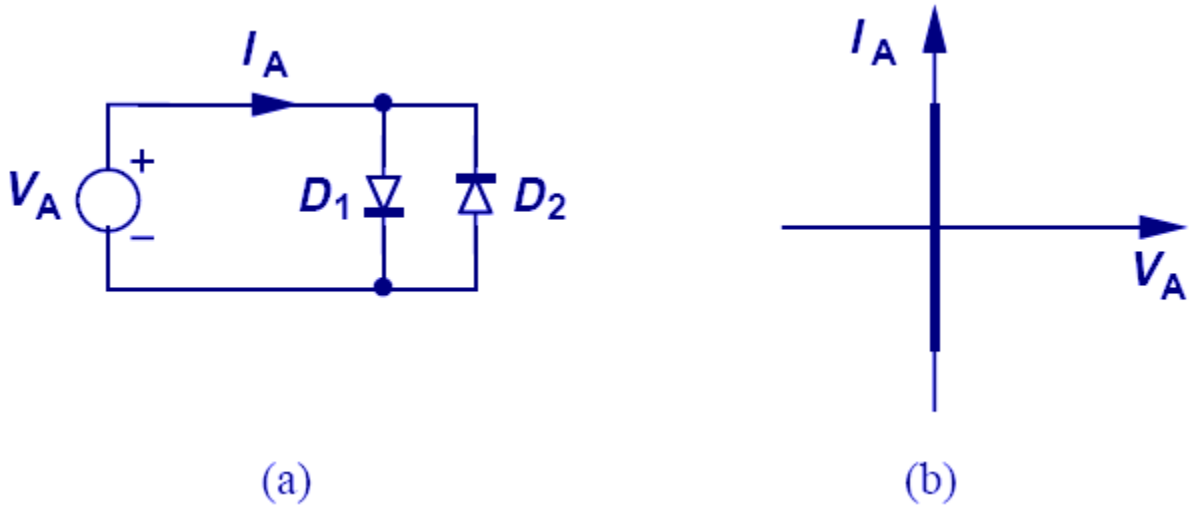
Assume : D1 : off, D2 : on

$$I_{D2} = \frac{10-(-10)}{15k} = 1.33mA$$

$$V = 10 - 5k \times I_{D2} = 3.35V$$

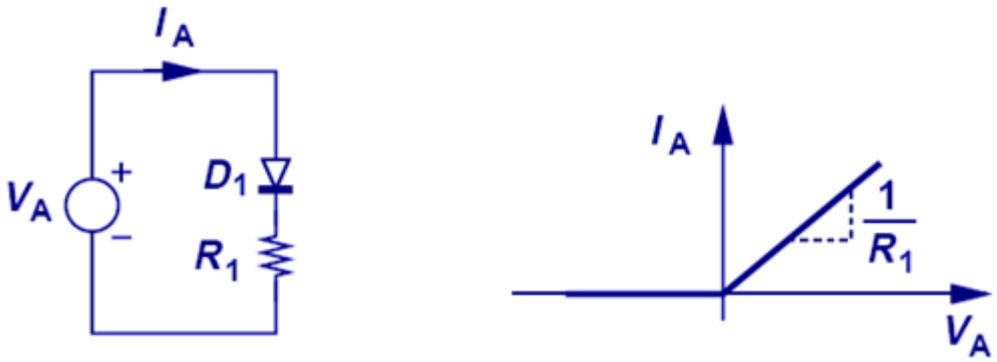
$$V_{D1} = 0 - V = -3.35 < 0$$

مشخصه جریان برحسب ولتاژ (مثال 1)

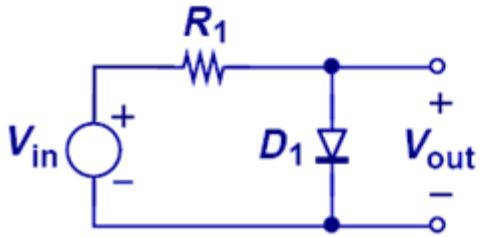


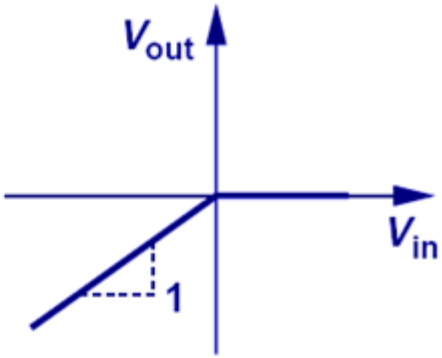
- اگر دو دیود به صورت موازی و در خلاف جهت یکدیگر قرار گرفته باشند، در آن صورت این مدار همواره به صورت اتصال کوتاه عمل خواهد کرد.

مشخصه جریان برحسب ولتاژ (مثال 2)



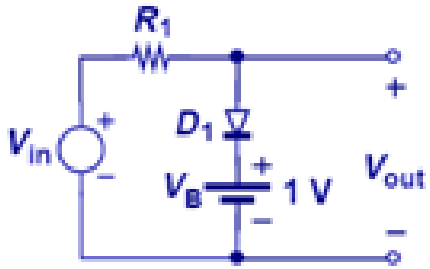
مشخصه خروجی برحسب ورودی (مثال 1)

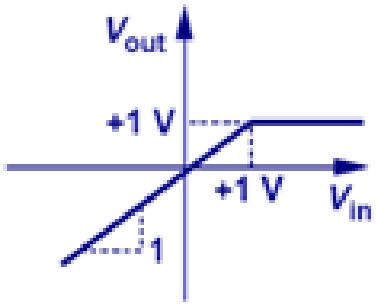




- When V_{in} is less than zero, the diode opens, so $V_{out} = V_{in}$.
- When V_{in} is greater than zero, the diode shorts, so $V_{out} = 0$.

مشخصه خروجی بر حسب ورودی (مثال 2)





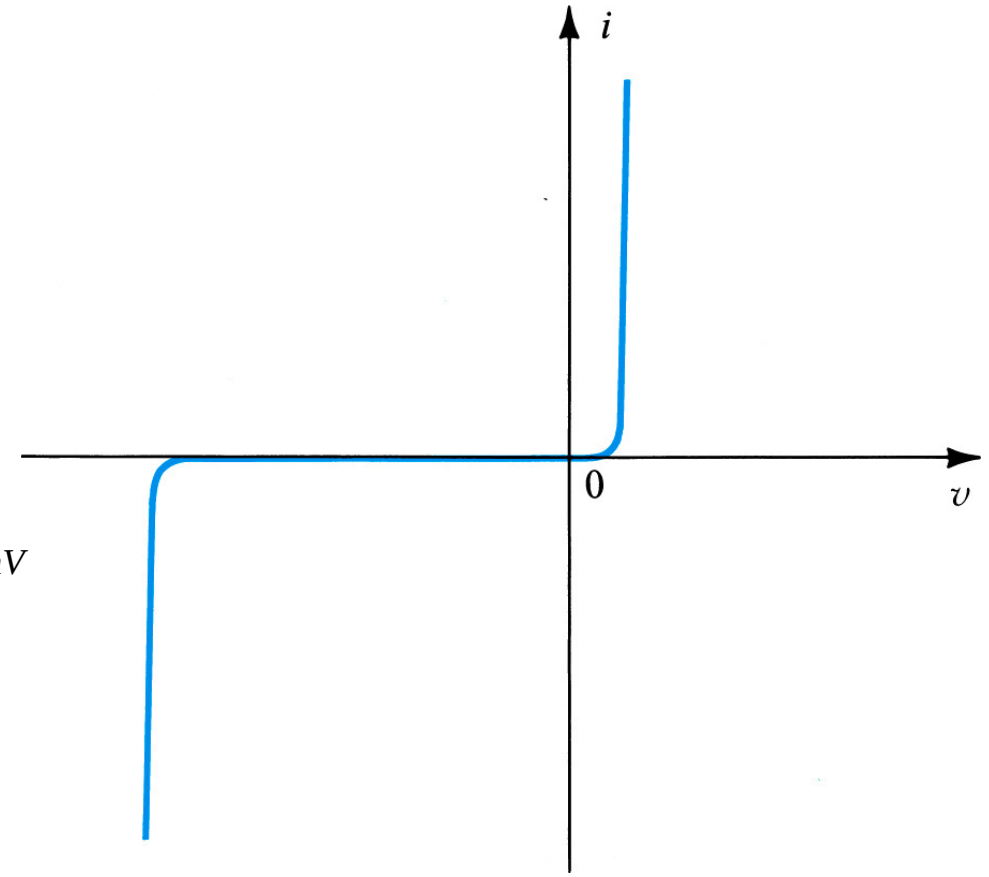
پیوند PN به عنوان دیود

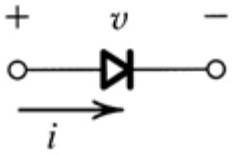
$$I = I_S\left(e^{\frac{V}{nV_T}} - 1\right)$$

$$1 \le n \le 2$$

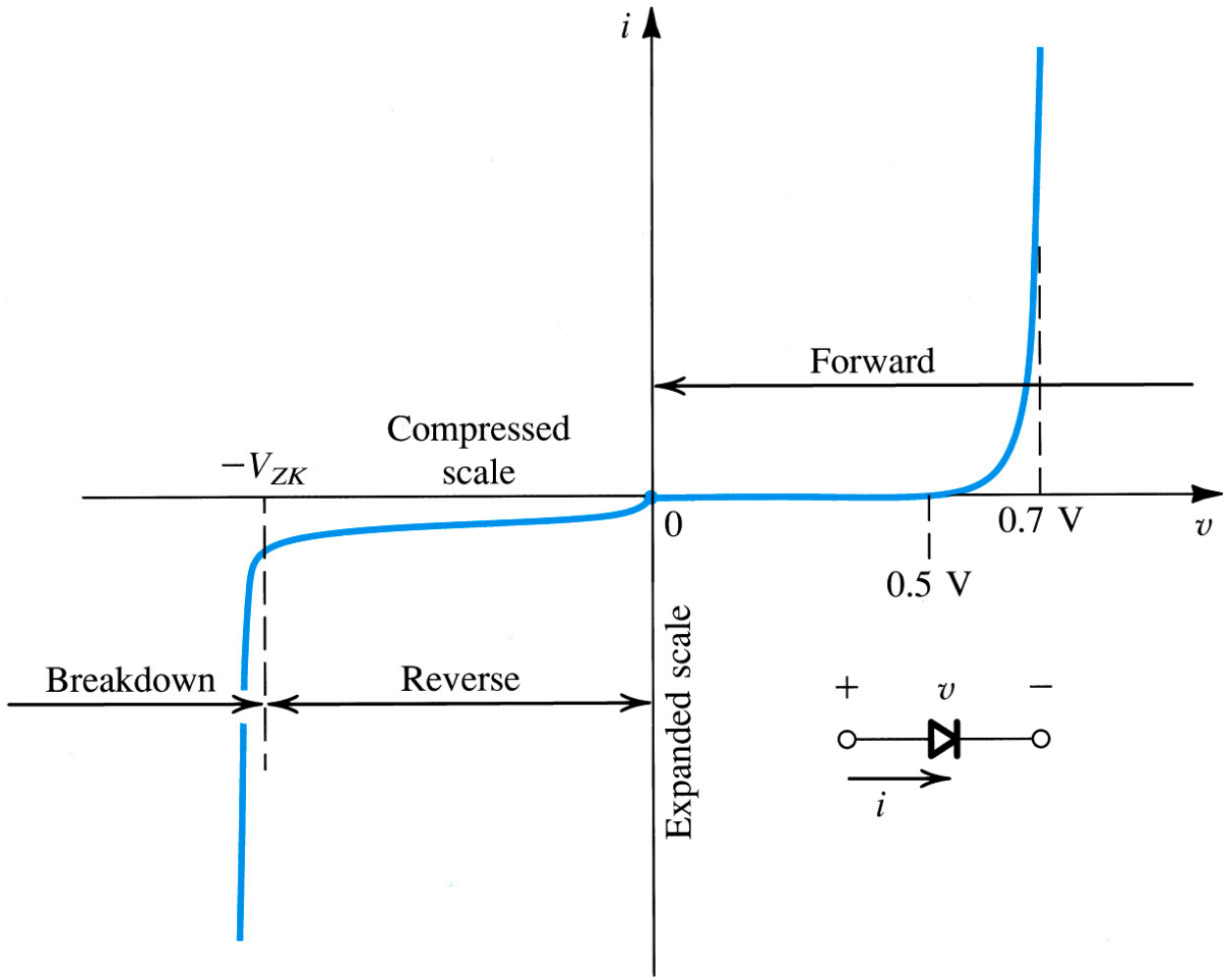
V_T: ولتاژ حرارتی $@T = 300 ==> V_T = \frac{kT}{q} = 26mV$

Is: جریان اشباع معکوس





PN Junction as a Diode



ناحیه بایاس مستقیم

- **when v > 0, we have:**

$$I = I_S\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right)$$

$$V_T : \text{thermal} \quad \text{voltage}, V_T = \frac{kT}{q} = 26mV$$

- **Approximated equations:**

$$I \cong I_S e^{\frac{V}{V_T}} \quad \text{or} \quad V \cong V_T \ln\left(\frac{I}{I_S}\right)$$

مثال

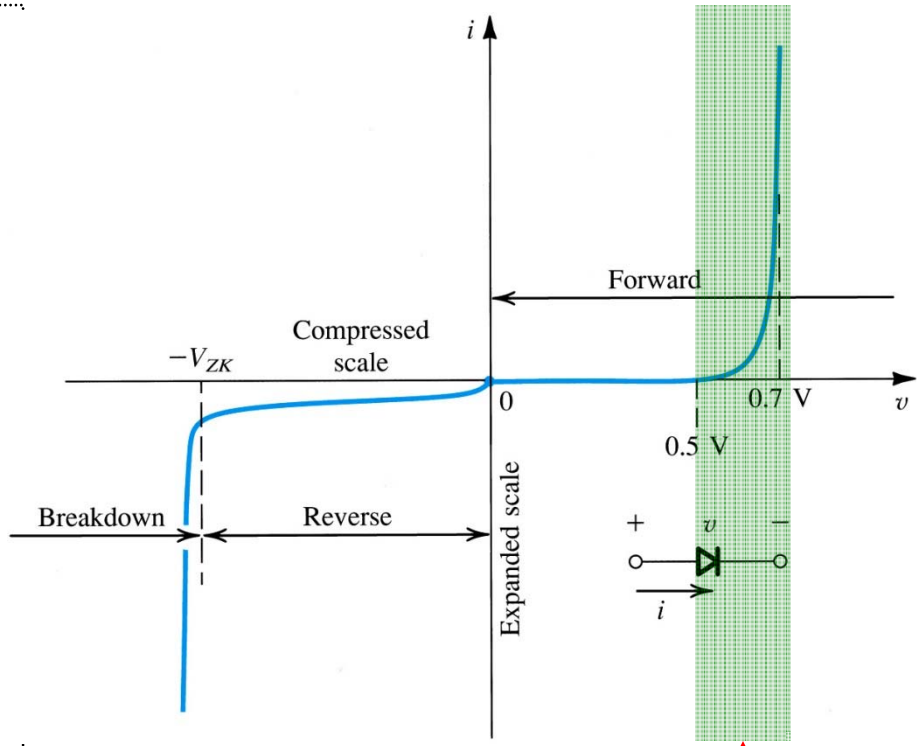
$$\Delta V = V2 - V1 = ?$$

$$\left.\begin{aligned} V1 &= V_T \ln\left(\frac{I}{I_S}\right) \\ V2 &= V_T \ln\left(\frac{10I}{I_S}\right) \end{aligned}\right\} \Longrightarrow \Delta V = V2 - V1 = V_T \ln(10) = 26mV \times 2.3 = 60mV$$

بایاس مستقیم

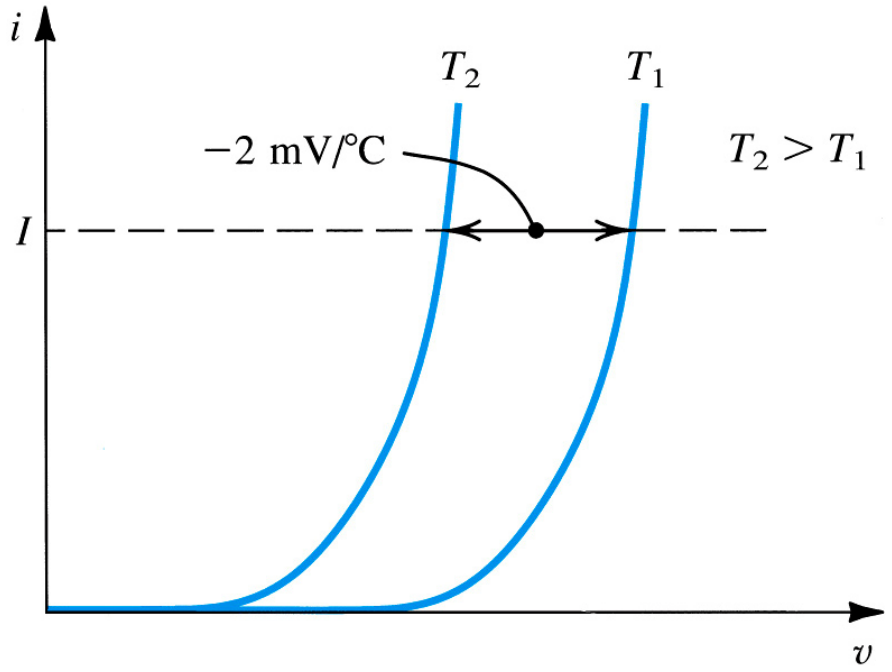
cut-in voltage: ولتاژ برش

- **ولتاژ برش، ولتاژی است که به ازای ولتاژ های کمتر از آن جریان بسیار کمی از دیود در جهت مستقیم عبور می کند.**
  - در دیود سیلیکنی این ولتاژ حدود 0.5 V است.
- **ناحیه هدایت کامل، ناحیه ای است که در آن مقاومت دیود R_{diode} تقریبا برابر با صفر است و دیود از نظر الکتریکی رسانایی خوبی از خود نشان می دهد.**
  - در دیود سیلیکنی به ازای ولتاژ 0.6 V الی 0.8 V، دیود هدایت خوبی از خود نشان می دهد.



fully conducting region

وابستگی دمایی



- به ازای یک جریان مشخص، اگر دما به اندازه 1 درجه سانتیگراد افزایش یابد در آن صورت ولتاژ دوسر دیود به اندازه 2 mV کاهش می یابد.
- به عبارت دیگر با افزایش دما، دیود زودتر روشن می شود.

ناحیه بایاس معکوس

- **when v<0, we have:**

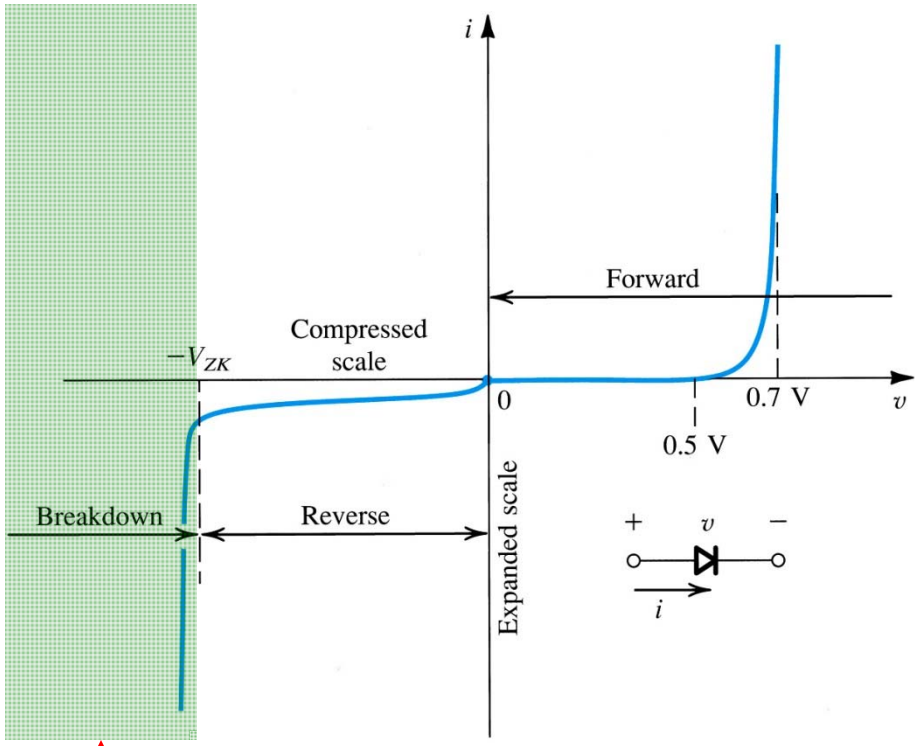
$$I = I_S\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right), \quad V_T : \text{thermal voltage}, V_T = \frac{kT}{q} = 26mV$$

- **Approximated equation:**

$$I \cong -I_S \quad |V| > V_T = 26mV$$

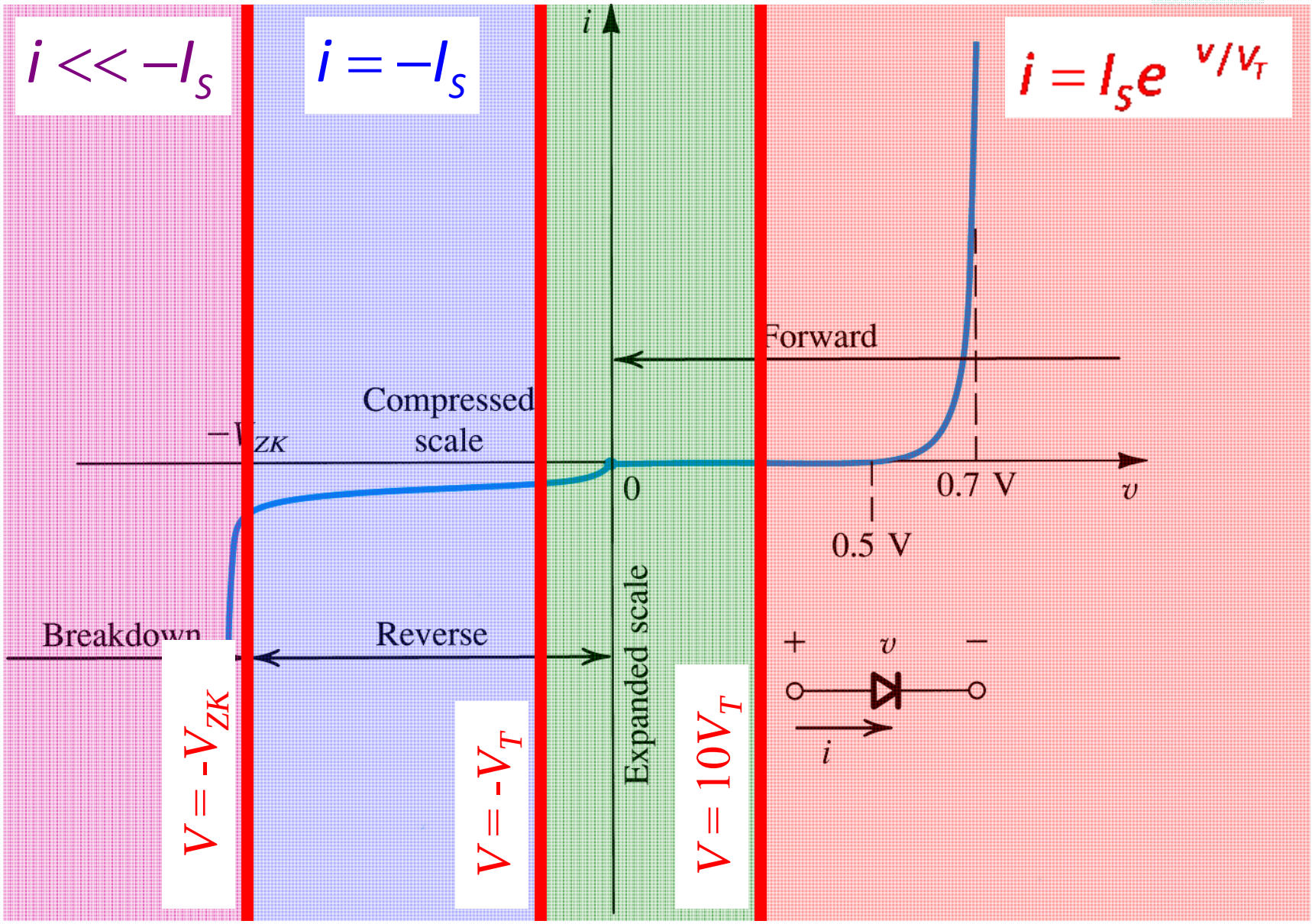
ناحیه شکست

- دیود وقتی وارد ناحیه شکست می شود که:
  $v < -V_{ZK}$
  Zener-Knee Voltage (V_{ZK}) –
- عملکرد دیود در ناحیه شکست می تواند غیر مخرب باشد مشروط بر اینکه جریان دیود در کنترل ما باشد.

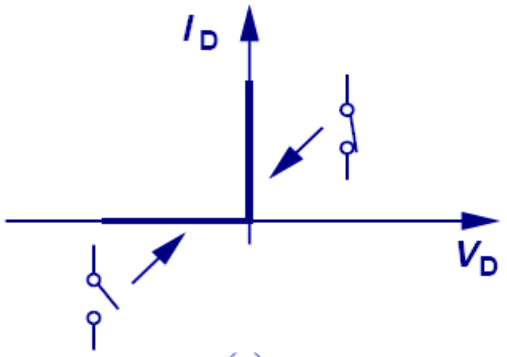


breakdown region

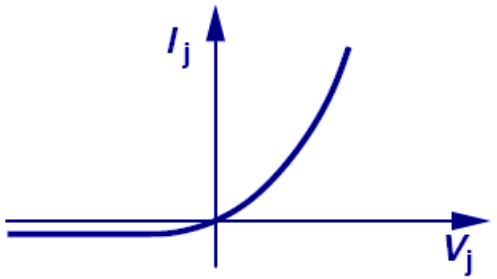
$i = I_S(e^{v/V_T} - 1)$


$i << -I_S$
$i = -I_S$
$i = I_S e^{v/V_T}$
i
Forward
Compressed scale
$-V_{ZK}$
0
0.7 V
0.5 V
v
Breakdown
Reverse
Expanded scale
$V = -V_{ZK}$
$V = -V_T$
$V = 10V_T$
+
v
−
i

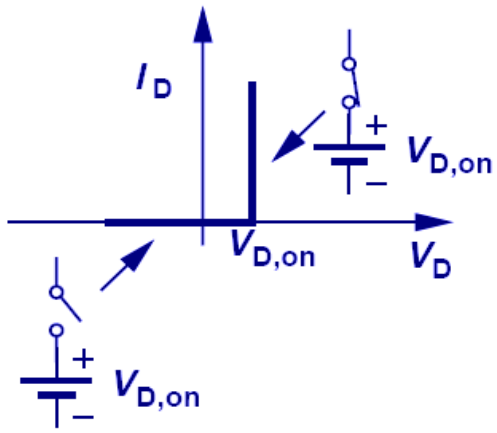
مدل های گوناگون برای دیود



(a)



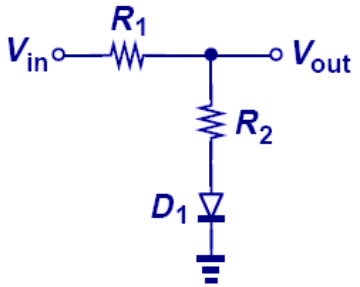
(b)



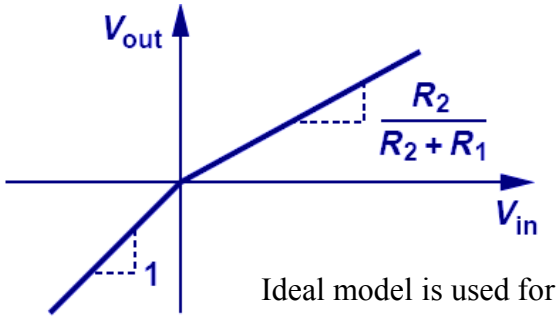
(c)

- تاکنون مدل دیود ایده آل مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این مدل، مدل نمایی و مدل ولتاژ-ثابت نیز برای دیود وجود دارد.

مشخصه خروجی بر حسب ورودی (مثال 1)

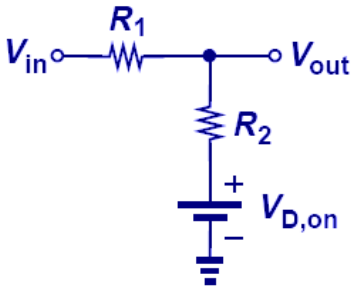


(a)

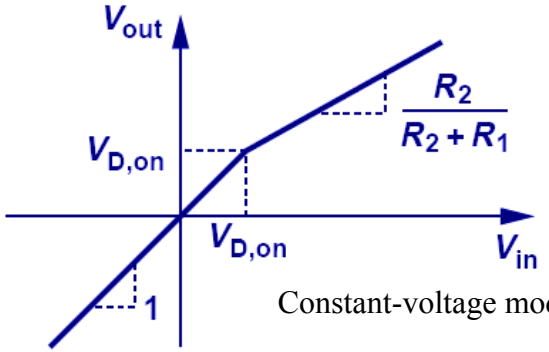


Ideal model is used for D1.

(b)



(c)

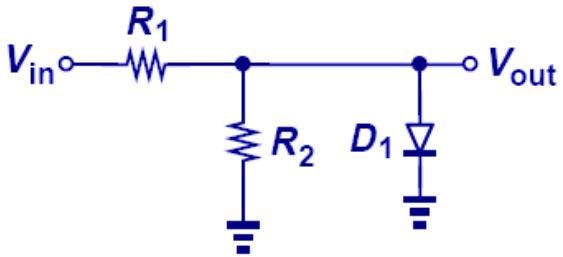


Constant-voltage model is used for D1.

(d)

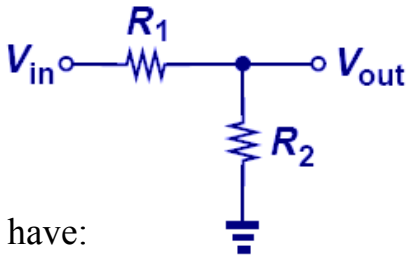
- مثال بالا را یک بار با مدل دیود ایده آل و باردیگر با مدل ولتاژ ثابت حل کرده ایم.
  مشاهده می شود که نقطه شکست دو منحنی متفاوت است.

مشخصه خروجی بر حسب ورودی (مثال 2)

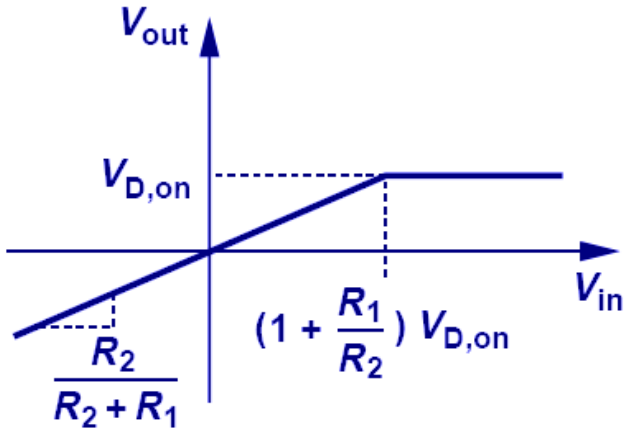


(a)

For D1: OFF, we have:

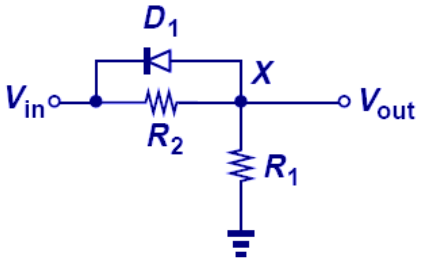


(b)



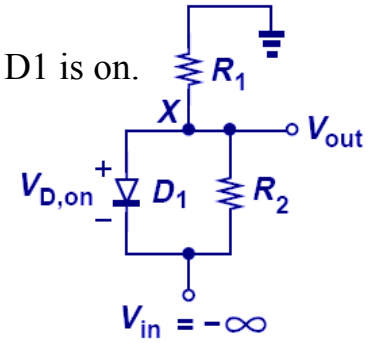
(c)

مشخصه خروجی بر حسب ورودی (مثال 3)



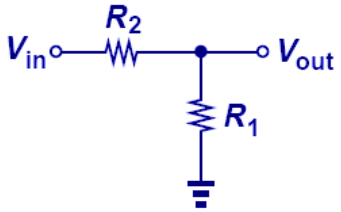
(a)

For Vin=-∞, D1 is on.

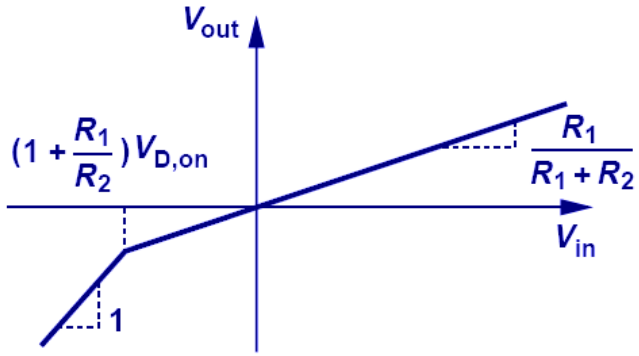


(b)

For Vin=+∞, D1 is off.

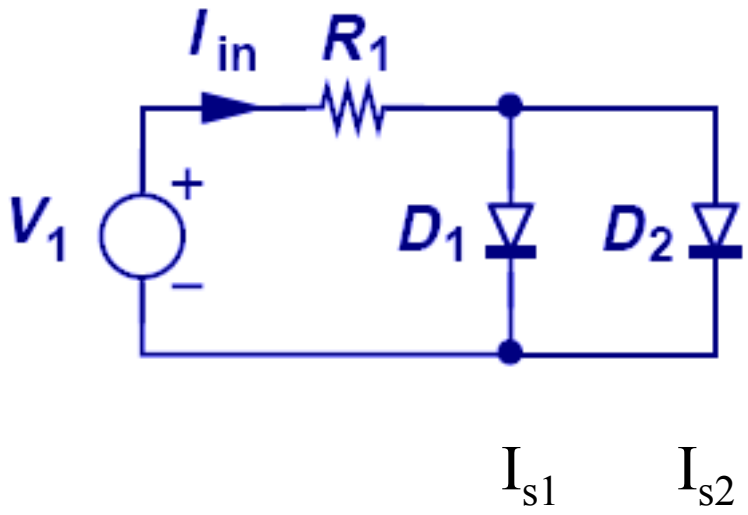


(c)



(d)

مدل نمایی

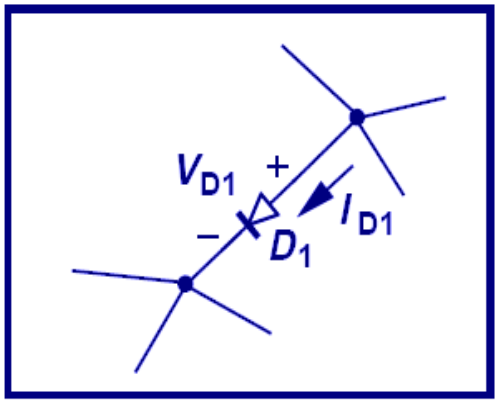


$$I_{D1} = \frac{I_{in}}{1 + \frac{I_{s2}}{I_{s1}}}$$

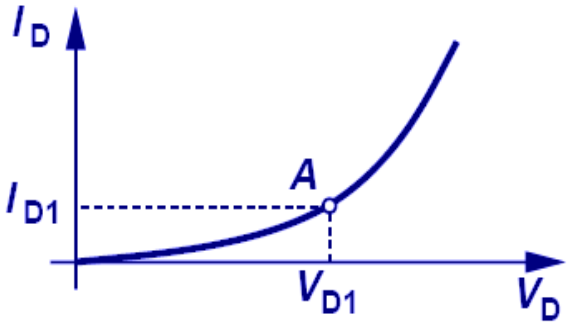
$$I_{D2} = \frac{I_{in}}{1 + \frac{I_{s1}}{I_{s2}}}$$

- در این مثال به دلیل متفاوت بودن جریان اشباع معکوس دیود ها، صرفا استفاده از مدل نمایی می تواند در حل مساله راه گشا باشد.

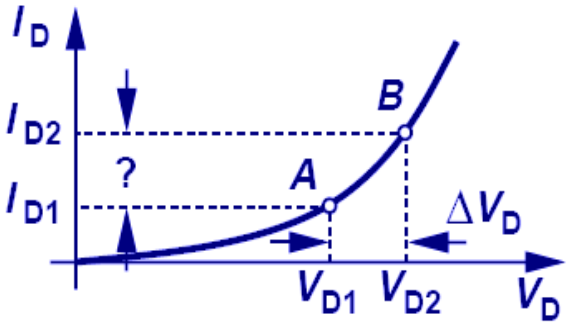
تحلیل سیگنال کوچک



(a)



(b)



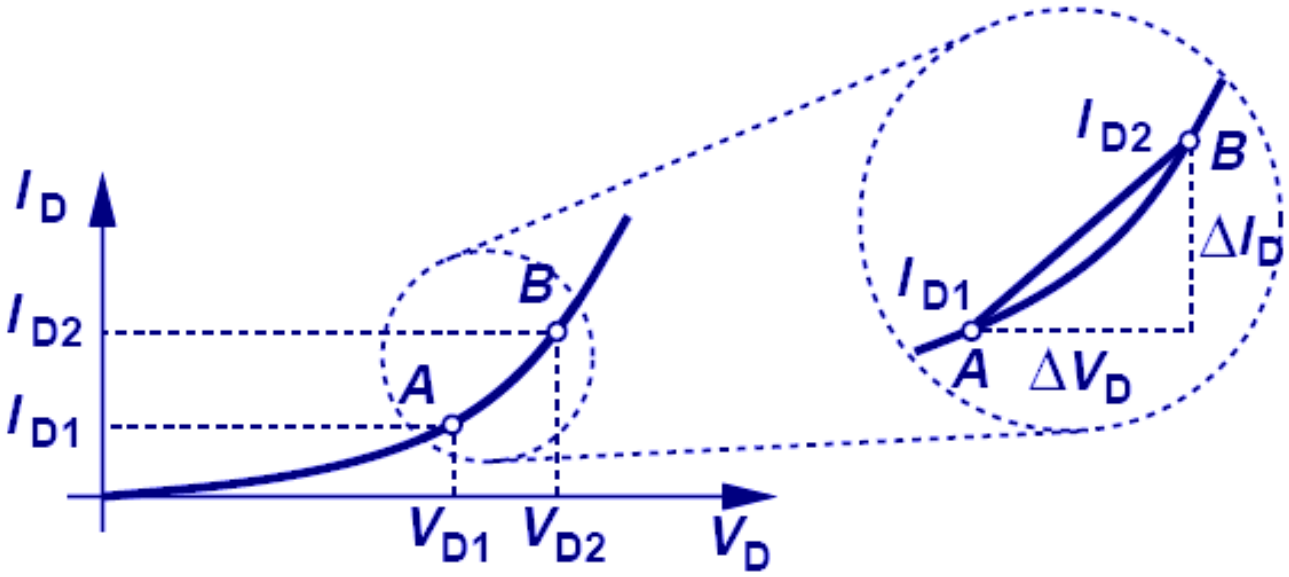
(c)

$$\Delta I_D = \frac{\Delta V}{V_T} I_{D1}$$

(این رابطه در اسلاید بعد اثبات می شود)

- **تحلیل سیگنال کوچک به این صورت انجام می شود که حول نقطه کار، ولتاژ دیود به اندازه جزیی تغییر می کند و به تبع آن تغییرات جریان دیود به صورت خطی و متناسب با تغییرات ولتاژ مشاهده می شود.**

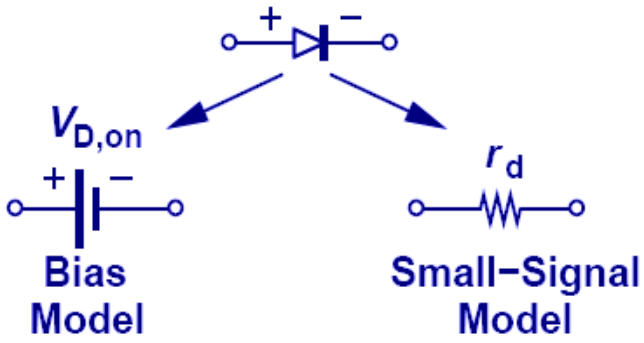
جزئیات تحلیل سیگنال کوچک



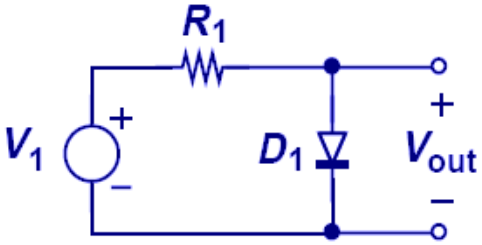
$$\frac{\Delta I_D}{\Delta V_D} = \frac{dI_D}{dV_D}\Big|_{VD=VD1}$$
$$= \frac{I_s}{V_T}\exp\frac{V_{D1}}{V_T}$$
$$= \frac{I_{D1}}{V_T}$$

- اگر دو نقطه از مشخصه IV دیود به اندازه کافی به هم نزدیک باشند (مثلا نقاط A و B)، مسیری که این دو نقطه را به هم متصل می کند همانند یک خط خواهد بود. شیب این خط بیانگر ضریب تناسب بین ΔI_D و ΔV_Dاست.

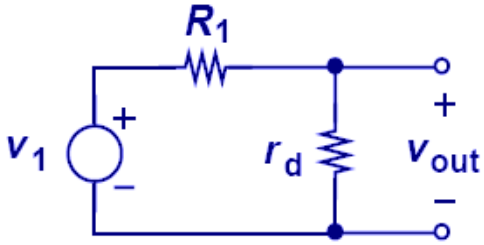
مقاومت سیگنال کوچک



(a)



(b)

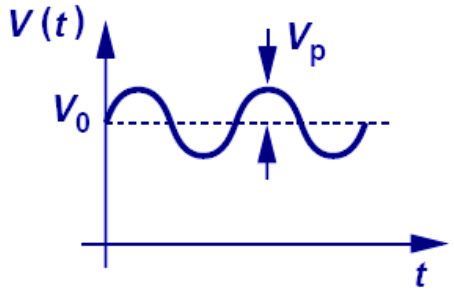


(c)

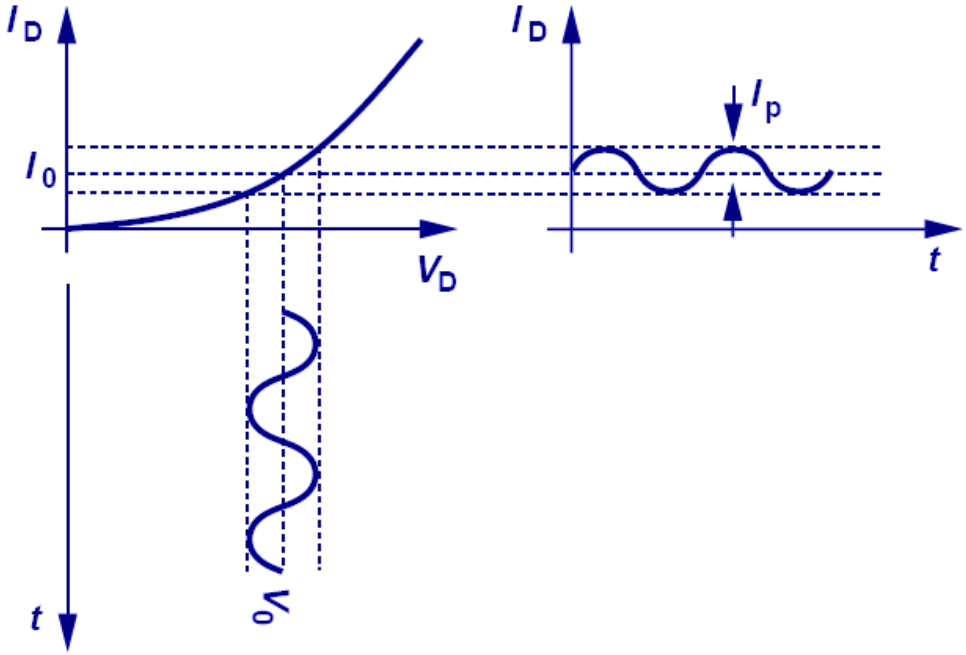
$$r_d = \frac{V_T}{I_D}$$

- هرگاه صرفا علاقمند به محاسبه سیگنال های کوچک باشیم، به دلیل وجود یک رابطه خطی بین ΔI_D و ΔV_D، در تحلیل سیگنال کوچک می توان دیود را همانند یک مقاومت خطی در نظر گرفت.

تحلیل سیگنال کوچک (ادامه)



(a)



(b)

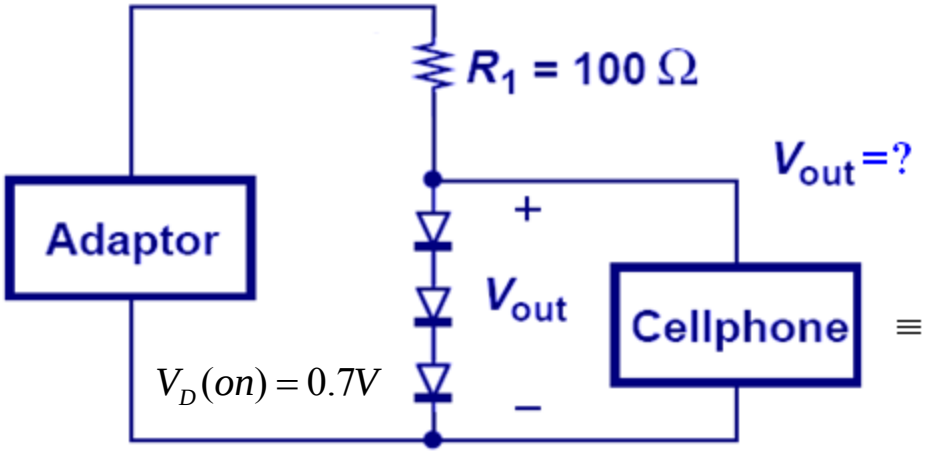
$$V(t) = V_0 + V_p \cos \omega t$$

$$I_D(t) = I_0 + I_p \cos \omega t = I_s \exp \frac{V_0}{V_T} + \frac{I_0}{V_T} V_p \cos \omega t$$

- اگر به دیود یک ولتاژ سینوسی با دامنه کوچک حول یک ولتاژ **dc** اعمال شود، در این صورت در خروجی نیز جریان سینوسی با دامنه کوچک حول یک جریان **dc** خواهیم داشت.

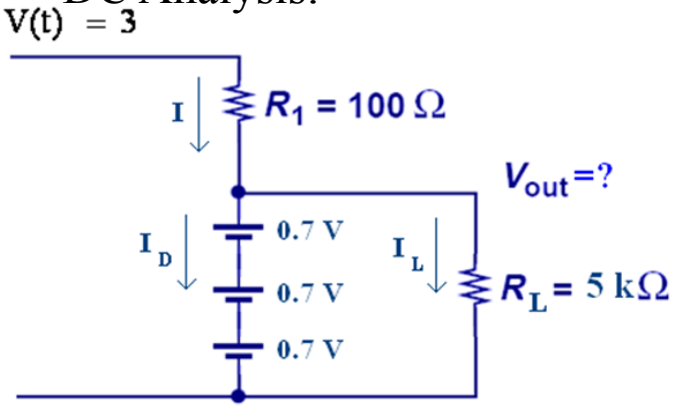
مثالی از آداپتور

$V(t) = 3 + 0.1\cos(\omega t)$



$\equiv \quad R_L = 5\ k\Omega$

DC Analysis:



$$V_{out}(dc) = 2.1\ V$$

$$I = \frac{3 - 2.1}{0.1k} = 9\ mA$$

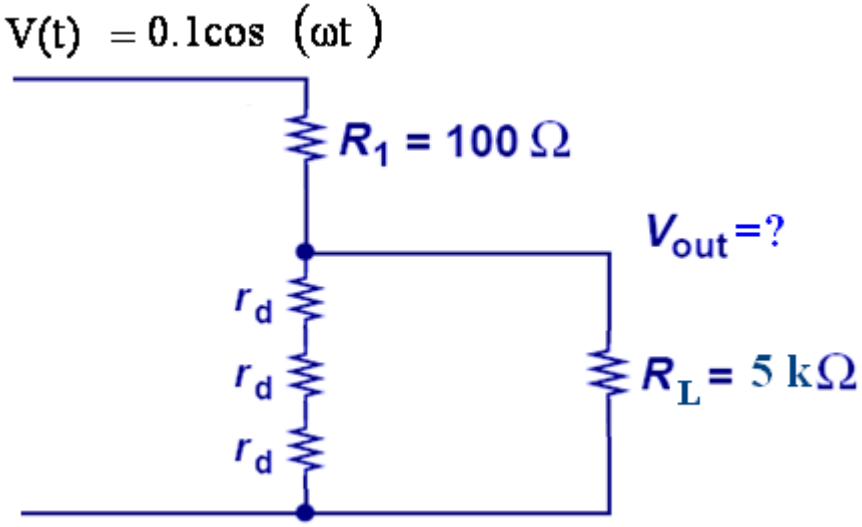
$$I_L = \frac{2.1}{5k} = 0.42\ mA$$

$$I_D = I - I_L = 8.58\ mA > 0$$

$$r_d = \frac{V_T}{I_D} = \frac{26mV}{8.58mA} = 3\ \Omega$$

ادامه مثال قبل

AC Analysis:



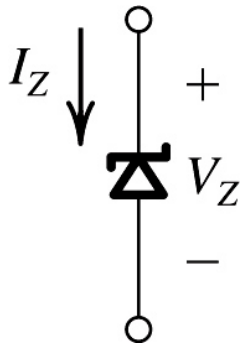
$$r_d = 3\,\Omega$$

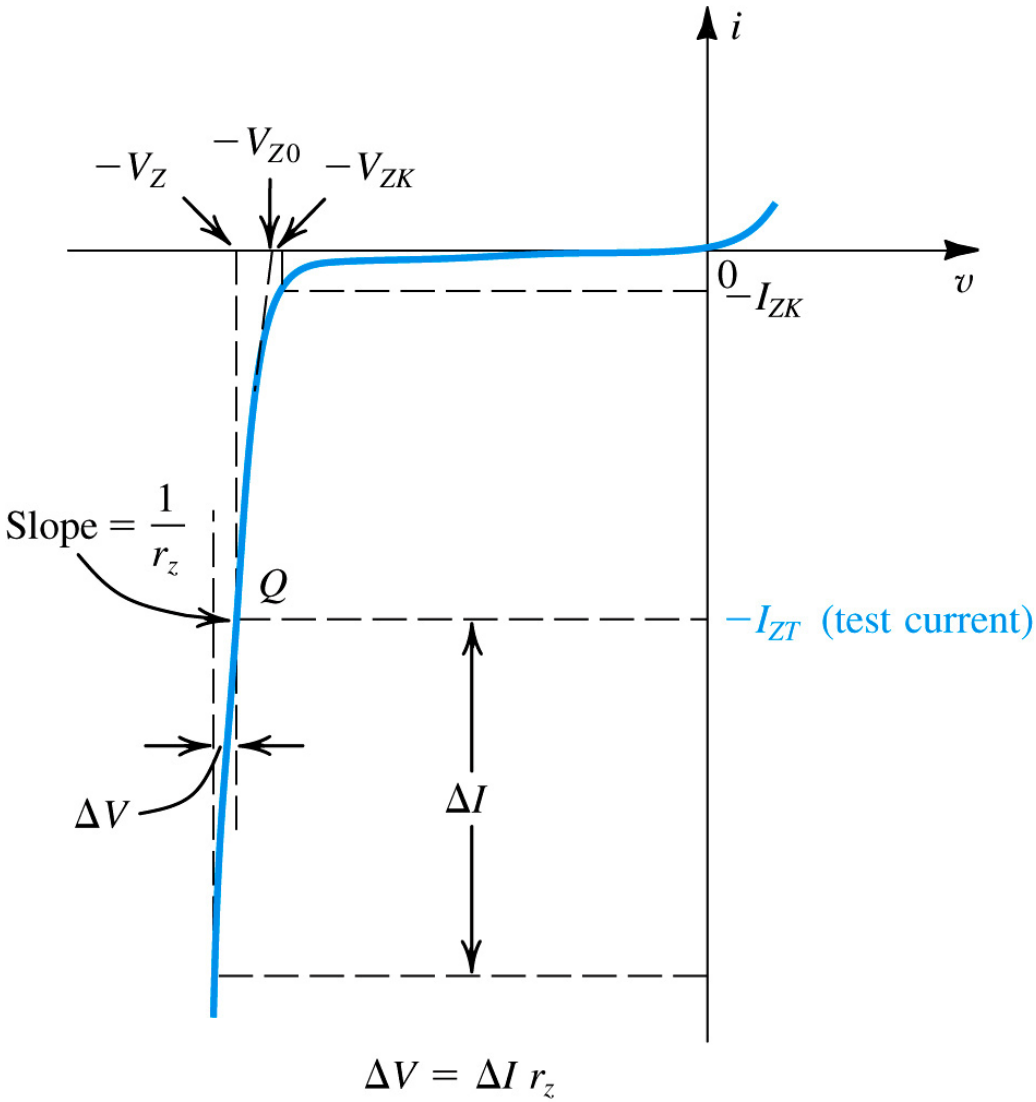
$$V_{out}(ac) = \frac{3r_d \| 5k}{3r_d \| 5k + 0.1k} \times 0.1\sin(\omega t) \cong \frac{3r_d}{3r_d + 0.1k} \times 0.1\sin(\omega t) = 8.3\text{mV}\sin(\omega t)$$

Superposition:

$$V_{out}(t) = V_{out}(dc) + V_{out}(ac) = 2.1\,\text{V} + 8.3\text{mV}\sin(\omega t)$$

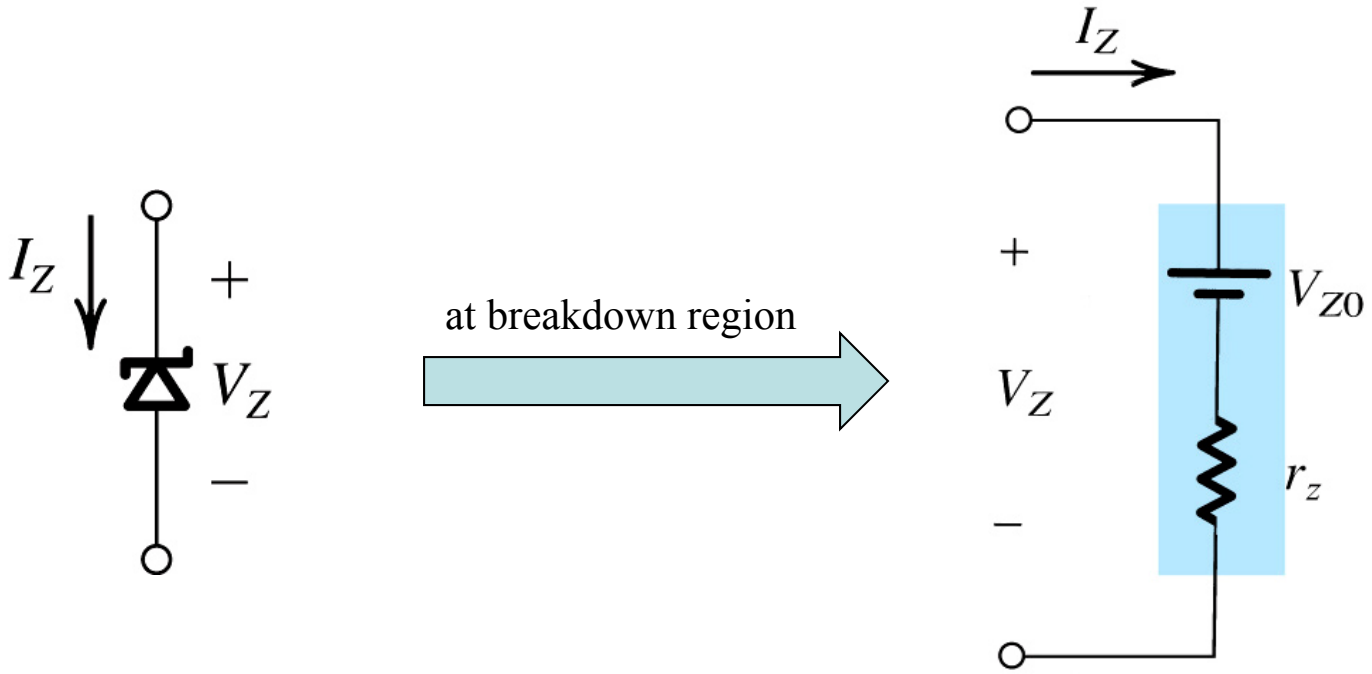
دیود زنر



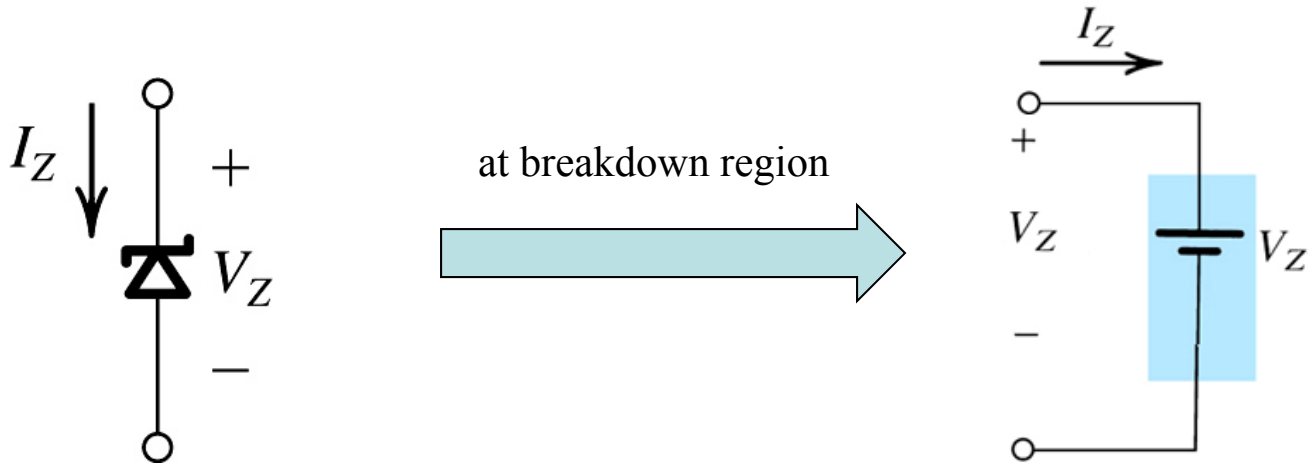


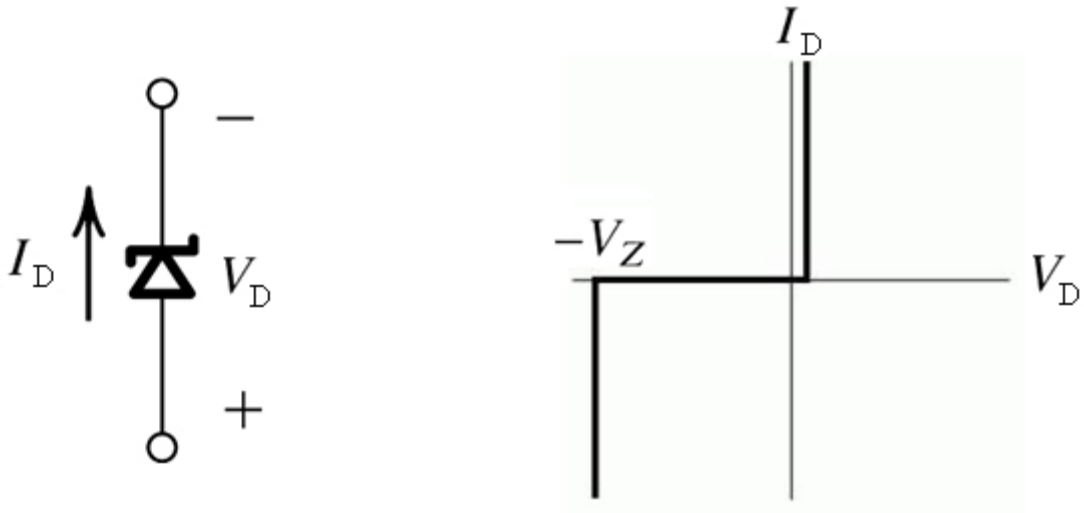
$$\Delta V = \Delta I \, r_z$$

مدل دیود زنر



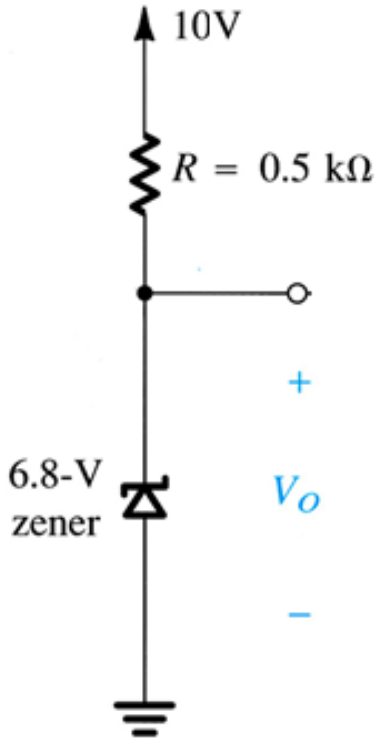
مدل ساده شده برای دیود زنر





مثال 1

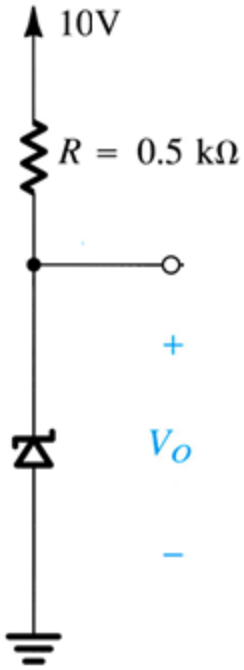
Vo=?



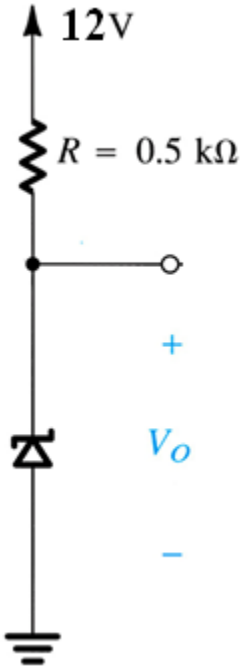
مثال 2

We know that : $V_z = 6.8\,V$ at $I_z = 5\,mA, r_z = 20\,\Omega$

Find Vo.



$$V_z = I_z \times r_z + V_{z0}$$
$$6.8 = 5mA \times 0.02k + V_{z0}$$
$$V_{z0} = 6.7V$$

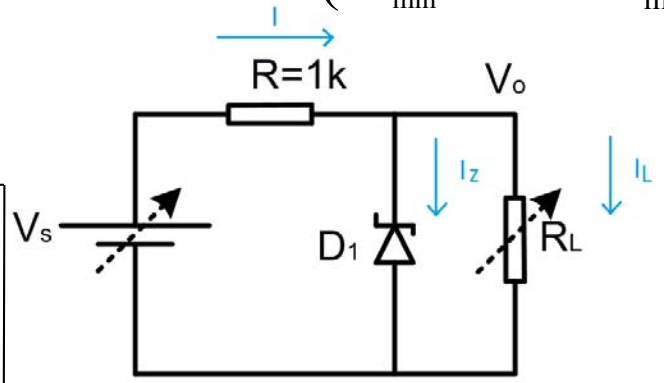


$$Vo = \frac{0.02k}{0.02k + 0.5k} \times 10 + \frac{0.5k}{0.02k + 0.5k} \times 6.7 = 6.82V$$

$$Vo = \frac{0.02k}{0.02k + 0.5k} \times 12 + \frac{0.5k}{0.02k + 0.5k} \times 6.7 = 6.90V$$

مثال 3

مقادیر Rl_{min} و RL_{max} را به گونه ای تعیین کنید که تنظیم ولتاژ dc خروجی به خوبی انجام شود. ($Rl_{min}<R_L<RL_{max}$)



$8V<V_s<10V$

$I_{zk}=0.2$ mA, $I_{zmax}=100$mA,

$V_{z0}=5$ V

$$I=\frac{Vs-5}{1k}=Vs-5$$

$$I_z=I-I_L=Vs-5-I_L$$

$$I_{zk}<I_z<I_{z\max}$$

$$I_{zk}<Vs-5-I_L \Longrightarrow I_L<Vs-5-I_{zk} \Longrightarrow \begin{cases} I_L<2.8mA \\ I_L<4.8mA \end{cases} \Longrightarrow I_L<2.8mA$$

$$Vs-5-I_L<I_{z\max} \Longrightarrow I_L>Vs-5-I_{z\max} \Longrightarrow \begin{cases} I_L>-97mA \\ I_L>-95mA \end{cases} \Longrightarrow I_L>-95mA$$

$$-95mA<I_L<2.8mA$$

In practice:

$$0<I_L<2.8mA$$

$$1.785k<R_L<\infty$$