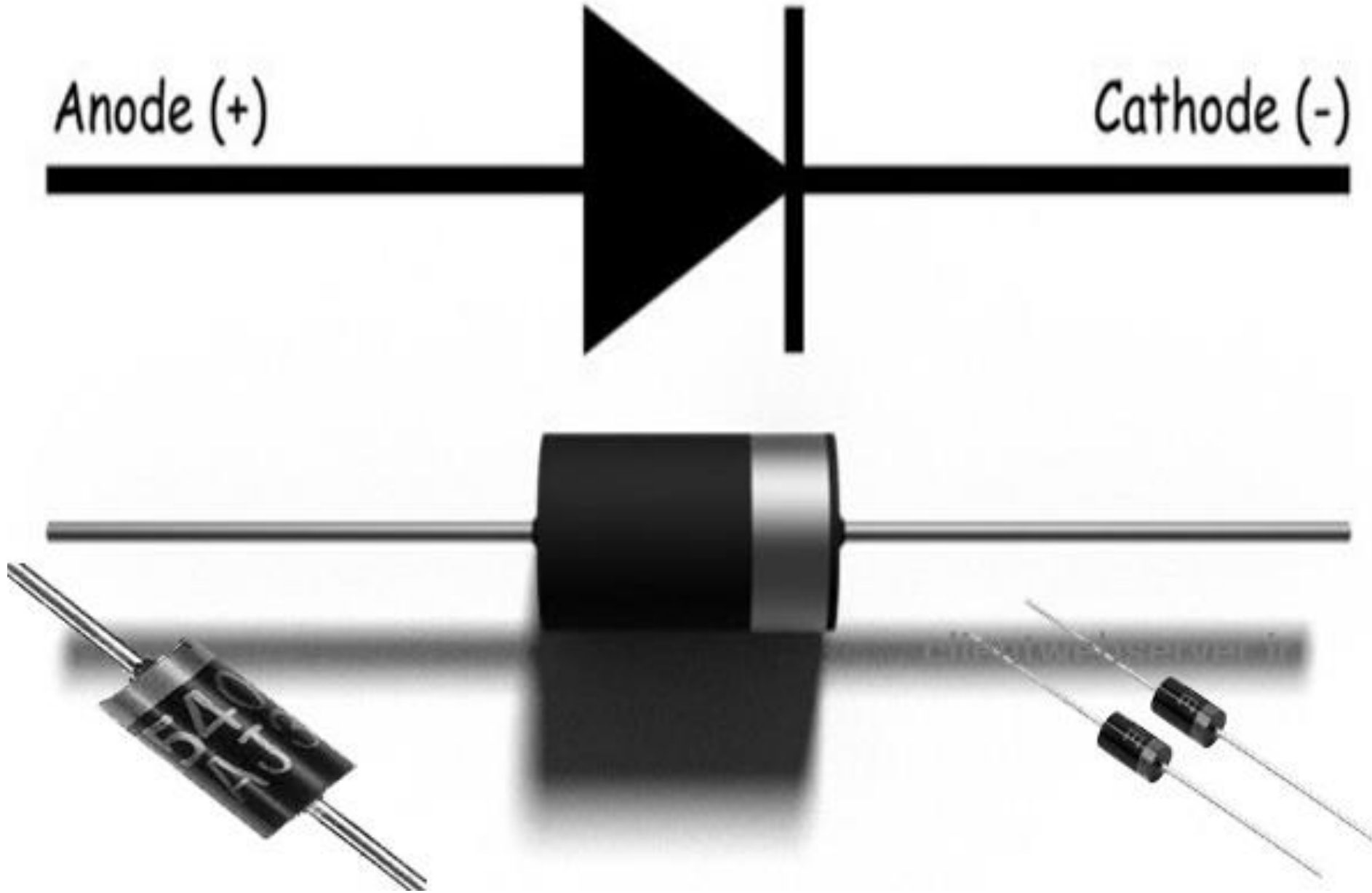
جلسه چهارم

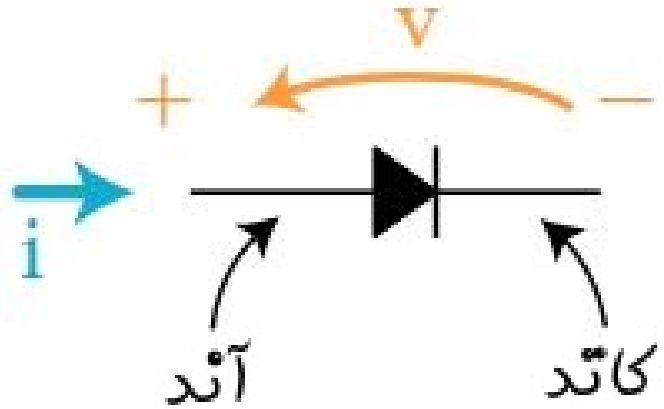

Anode (+)
Cathode (-)

دیود Diode

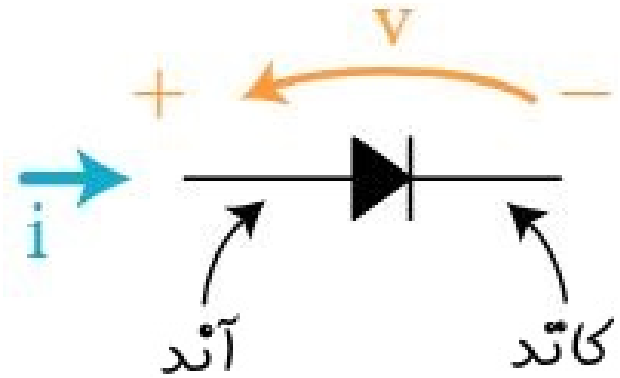
هرگاه دو قطعه نیمه هادی یکی از نوع N و دیگری از نوع P را در کنار هم قرار دهیم، یک قطعه الکترونیکی با کارکردی جالب را خواهیم داشت. این قطعه پرکاربرد با عملکردی جذاب دیود نامیده می شود که در مدارهای الکتریکی از آن استفاده می‌شود. ویژگی اصلی این قطعه، عبور دادن جریان الکتریکی در یک جهت است.

نماد دیود

با توجه به این که دیود جریان الکتریکی را تنها در یک جهت عبور می‌دهد، بنابراین نماد استفاده شده برای آن نیز بایستی بیان گر این موضوع باشد. در شکل زیر مسیر جریان عبوری از یک دیود و هم چنین نماد استفاده شده برای آن نشان داده شده است.



بردار مشکی رنگِ ◄ جهت جریان الکتریکیِ i را نشان می‌دهد. جهت مثبت دیود، پایه ای است که جریان الکتریکی به آن وارد و جهت منفی دیود، پایه ای است که جریان از آن خارج می‌شود. احتمالا شما نیز متوجه مفهوم این نماد شده‌اید. خط عمودی استفاده شده نشان می‌دهد که جریان، اجازه عبور از سمت راست به چپ را ندارد.

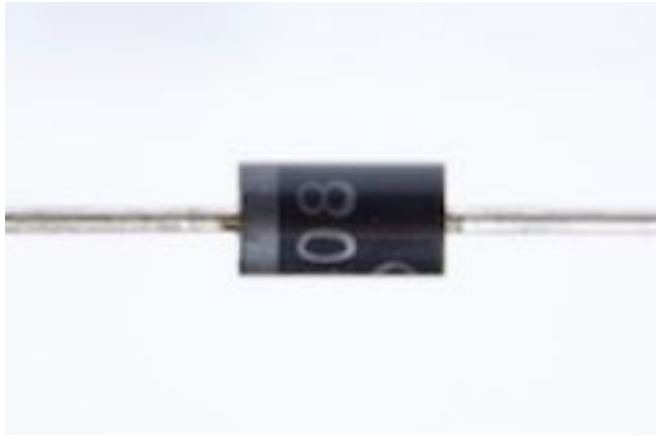


ترمینال

با توجه به آن چه که در بالا بیان شد، نماد دیود، جهت جریان الکتریکی را به ما نشان می‌دهد. به بخش منفی دیود، «کاتد» (Cathode) و به بخش مثبت آن، «آند» (Anode) گفته می‌شود. این دو بخش ترمینال‌های یک دیود نامیده می‌شوند.

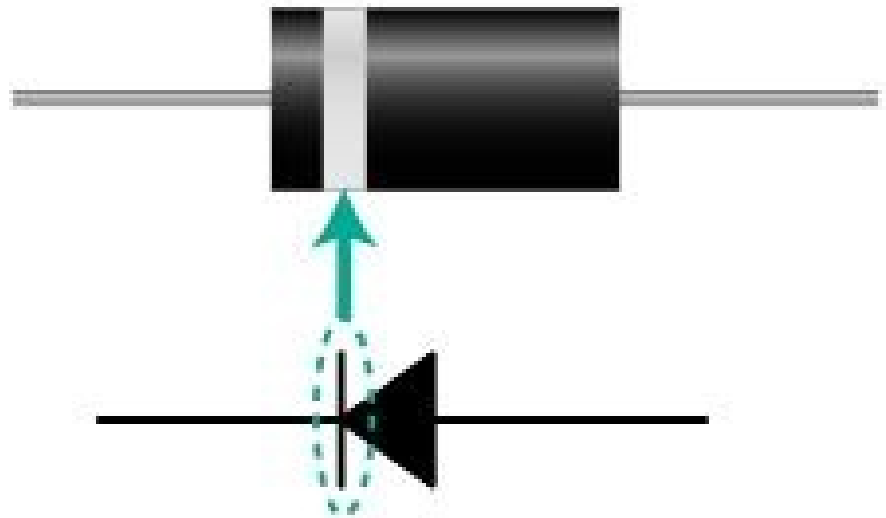
تشخیص ترمینال‌ها در یک دیود واقعی

دیودها به شکل قطعاتی بسیار کوچک از سیلیکون طراحی و ساخته می‌شوند. راه‌های مختلفی جهت تشخیص پایه‌های یک دیود وجود دارد. معمولا در دیودهای به شکل شیشه یا پلاستیکِ مشکی، بخشی مجزا توسط یک نوار مشخص شده است. نوار مجزا شده، ترمینالِ کاتد دیود را نشان می‌دهد. در زیر دو نمونه از این گونه دیودها نمایش داده شده است.

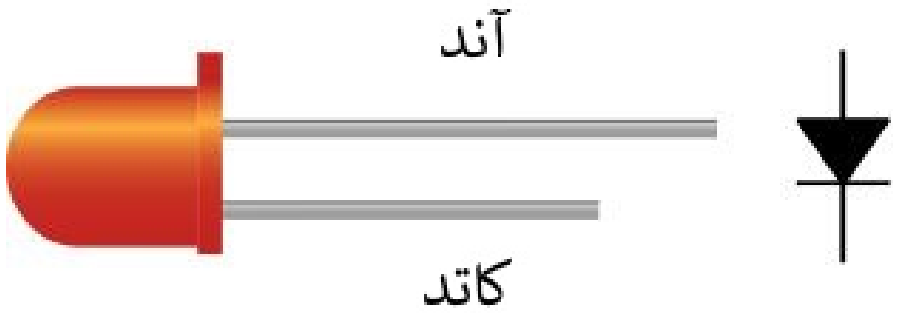


کاتد

آند



در **LED** ها نیز پایه‌ها با اندازه متفاوت ساخته می‌شوند. جریان از سمت پایه بلند تر به دیود وارد شده و از سمت پایه کوتاه تر خارج می‌شود. از این رو پایه بلند تر آند و کوتاه تر، کاتد را نشان می‌دهند. شماتیک زیر یک LED و ترمینال‌هایش را ترسیم کرده است.

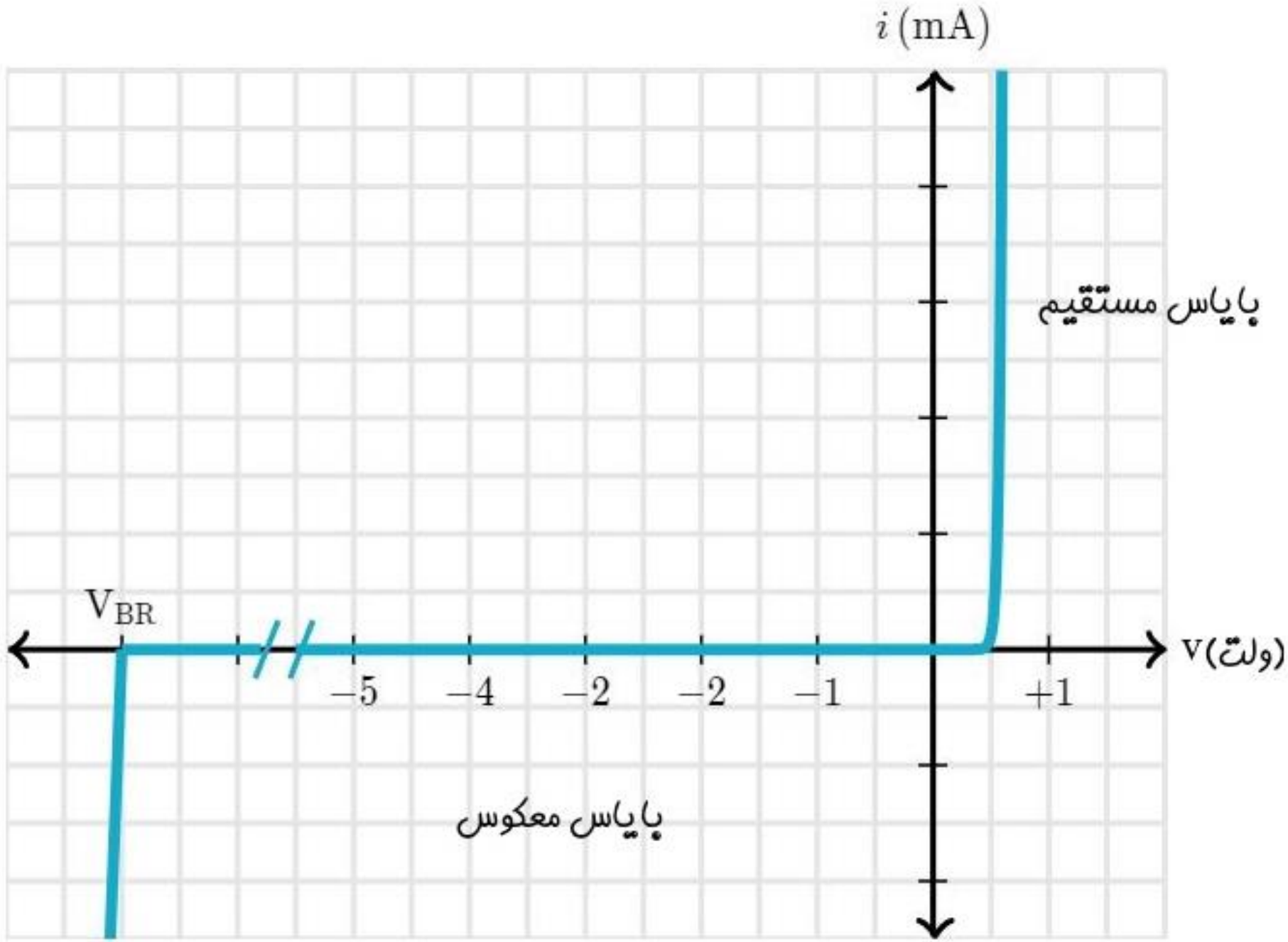


جریان مستقیم و معکوس

بسته به نوع کاربری، دیودها را می توان به شکل‌های گوناگونی در یک مدار قرار داد. در هرکدام از این حالات، جریان برقرار شده در دیود به صورت متفاوتی عمل می کند.

جریان مستقیم

فرض کنید در دو سر یک دیود سیلیکونی، ولتاژی برابر با 0.2V اعمال شود. با اعمال این ولتاژ، جریان الکتریکی در دیود برقرار نخواهد شد. زمانی که اندازه ولتاژ تا 0.6V افزایش یابد، جریان الکتریکی قابل اندازه گیری در دیود برقرار خواهد شد. با افزایشِ بیشتر از این مقدار، جریان به سرعت در دیود افزایش خواهد یافت. در این نقطه، نمودار i-v تقریبا به صورت عمودی خواهد شد. شکل بعد نمودار جریان-ولتاژ برای دیودی سیلیکونی نشان داده شده.


$i\,(\mathrm{mA})$
بایاس مستقیم
V_{BR}
−5
−4
−2
−2
−1
+1
v(ولت)
بایاس معکوس

با توجه به مفاهیم بالا، زمانی که ولتاژی مثبت دو سر یک دیود اعمال شود، به حالت ایجاد شده، «بایاس مستقیم» (Forward Bias) گفته می‌شود. در حقیقت زمانی یک دیود بایاس مستقیم است که در تمامی نقاط، ولتاژ در بخش مثبت قرار گرفته باشد. در شرایطی نرمال، ولتاژ در حالت بایاس مستقیم، بین 0.6 تا 0.75 ولت است. اگر ولتاژ اعمال شده، در شرایطی اجباری بیشتر از 0.75 ولت شود، جریان الکتریکی بسیار زیاد خواهد شد که منجر به داغ شدن دیود می شود.

جریان معکوس

اگر ولتاژی منفی دو سر دیود اعمال شود، پایه – در پتانسیل بیشتری نسبت به + قرار دارد. به دیود در این حالت، دیود با بایاس معکوس (Reverse Bias) گفته می شود. در حالت معکوس، اندازه جریان الکتریکی تقریبا نزدیک به صفر و دارای مقداری منفی است.

به این جریان، «جریان اشباع معکوس» (Reverse Saturation Current) نیز گفته می شود. اندازه این جریان در دیودهای استاندارد بین $Is=10^{-9}$ A تا $Is=10^{-12}$ A است؛ البته در تحلیل های الکتریکی این مقدار را برابر با صفر در نظر می گیرند.
دیود در حالت بایاس، در بعضی موارد ممکن است نتواند نقش خود را ایفا کند. برای نمونه در ولتاژهای بالا، تحت عنوان «ولتاژ شکست» (Breakdown Voltage) یا V_{BR}، دیود همانند یک رسانا عمل کرده و جریان الکتریکی را از خود عبور می دهد. در لحظه شکست، جریان به سرعت و در جهت معکوس افزایش می یابد. اندازه V_{BR} در یک دیود معمولی حدود 50V- است. در اکثر موارد تلاش بر این است که دیود به دور از ولتاژ شکست نگه داشته شود.

رابطه بین جریان و ولتاژ در یک دیود

رابطه جریان - ولتاژ برای یک دیود، با استفاده از ثابت‌های تعیین شده در آزمایشگاه، مشخص می‌شود.
معمولا رابطه بین جریان و ولتاژ را در دیودها مطابق با معادله زیر در نظر می‌گیرند.

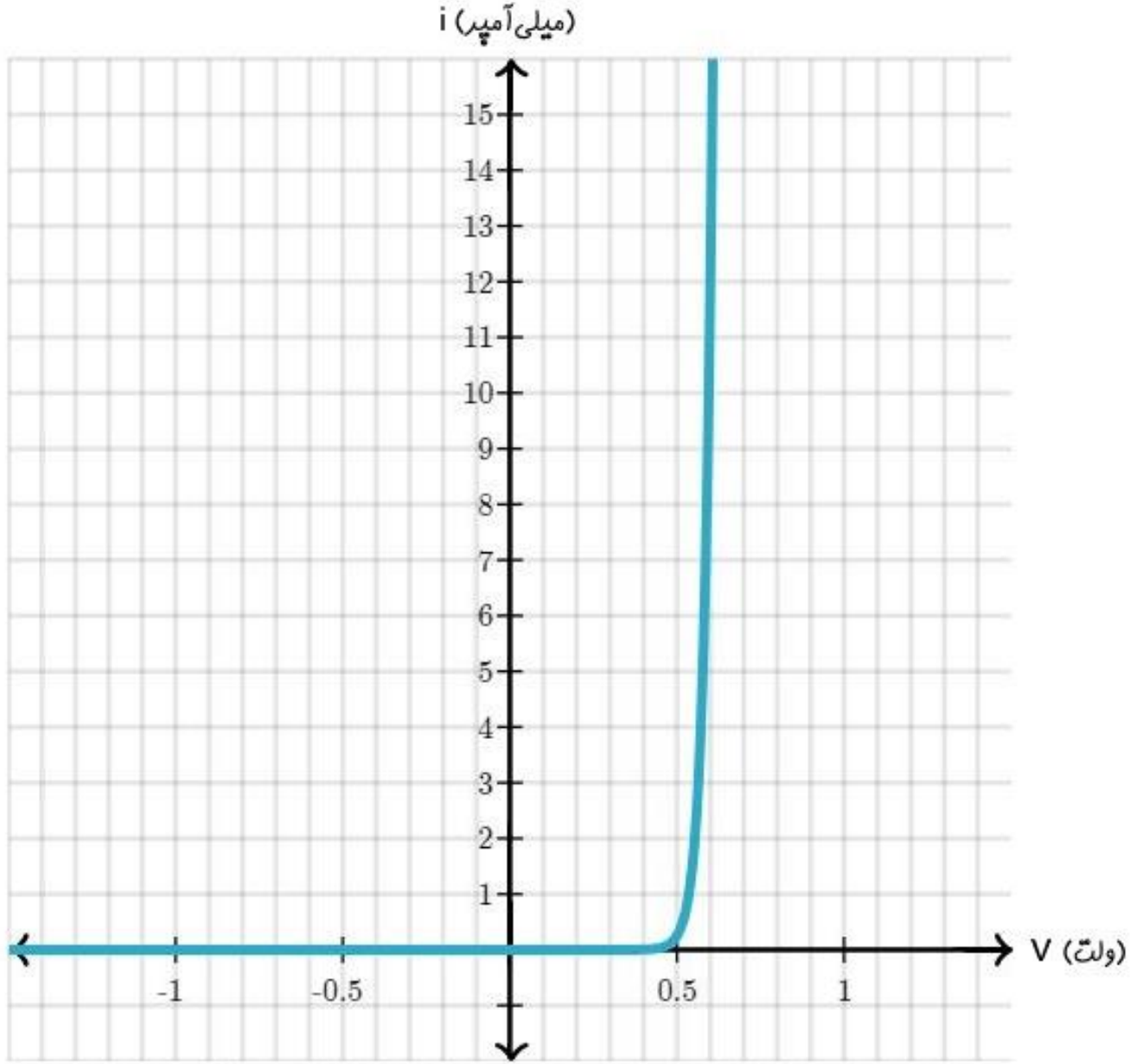
$$i = \mathrm{I_S}\left(e^{q v / k\mathrm{T}} - 1\right)$$

در این رابطه، T، v، k، q به ترتیب نشان دهنده دما، ولتاژ دو سر دیود، ثابت بولتزمن و بار الکترون هستند. مقادیر k و q برابر هستند با:

$$q = 1.602 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$$

$$k = 1.380 \times 10^{-23}\,\mathrm{J/K}$$ (ژول بر کلوین)

رابطه بالا به ازای مقادیر مثبت ولتاژ صادق است. در حقیقت این مفهوم یک طرفه بودن دیود را نشان می دهد. در نمودار بعد منحنی مبتنی بر معادله بالا نشان داده شده است.

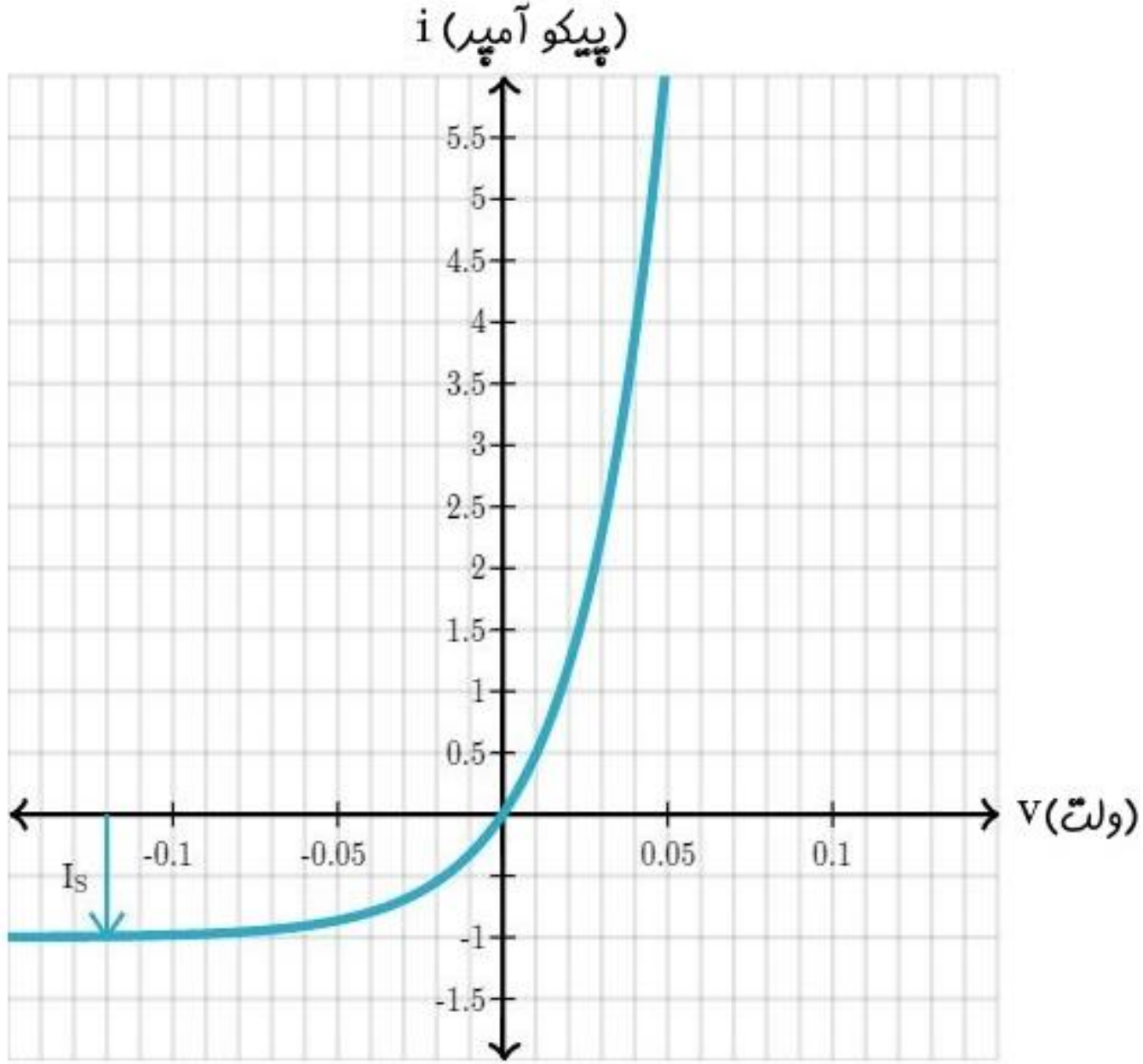

i (میلی‌آمپر)
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
-1
-0.5
0.5
1
V (ولت)

با استفاده از این فرضیات، رابطه ولتاژ- جریان در دمای اتاق را می توان به شکل زیر بدست آورد.

$$\frac{kT}{q} = \frac{4.14 \times 10^{-21}\,\mathrm{J}}{1.602 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}} = 25.8 \approx 26\,\mathrm{mV}$$

$$i = I_S\,(e^{v/26\mathrm{mV}} - 1)$$

معمولا از این معادله بصورت تحلیلی جهت توصیف رفتار دیود استفاده نمی شود. معمولا از تحلیل نموداری و تصویری جهت توصیف رفتار دیود استفاده می‌شود.
دلیل اینکه نمودار قبل، حالتی نمایی ندارد، این است که درنمودار نشان داده شده جریان الکتریکی بر حسب میلی آمپر است. در حقیقت اگر این رابطه بر حسب پیکو آمپر رسم شود، شکل بعد بدست می آید.

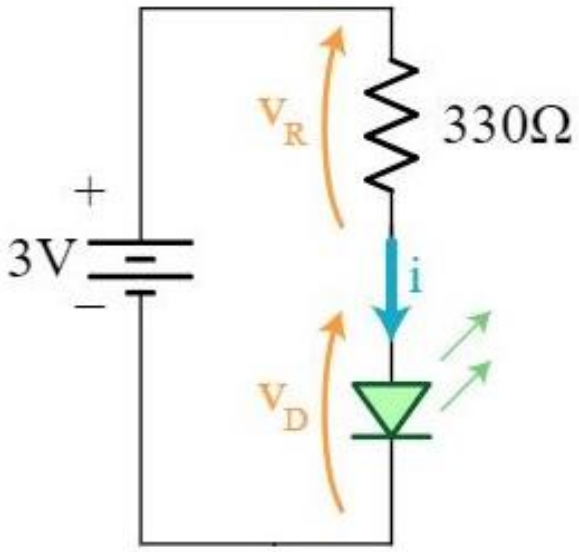

i (پیکو آمپر)
5.5
5
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
-1
-1.5
-0.1
-0.05
0.05
0.1
V(ولت)
I_S

در شکل قبل I_S نشان دهنده جریان اشباع است. همچنین در این شکل مقادیر اندک جریانِ اشباعِ منفی، قابل روئیت است. مقدار جریان معکوس اشباع، در دیودهای سیلیکونی حدود 10^{-12} و در دیودهای ژرمانیومی حدود 10^{-6} آمپر است. توجه داشته باشید که رابطه زیر بیان کننده یک مدل سازی است و نمی توان از آن به عنوان یک قانون یاد کرد. بنابراین در حالت کلی رابطه بین جریان و ولتاژ در یک دیود به نحوه ساخت، جنس، دما و غیره وابسته است.

$$i = \mathrm{I_S}\,(\,e^{q\,v/kT} - 1)$$

مثال :

فرض کنید مدار بسته ای شامل منبع تغذیه، دیود و مقاومت باشد. در شکل زیر دیود مذکور و شماتیک مدار مرتبط با آن نشان داده شده.



با توجه به مدار روبرو بدیهی است که جریان i، در مقاومت و دیود با یکدیگر برابر هستند. فرض کنید می‌خواهیم رابطه بین جریان i و ولتاژ V_D دو سر دیود را بیابیم. با استفاده از معادله ارائه شده برای دیود، داریم:

$$i = \mathrm{I_S}\left(e^{v_\mathrm{D}/26\,\mathrm{mV}} - 1\right)$$

از طرفی با نوشتن قانون اهم برای مقاومت، می توان نوشت :

$$i = \frac{v_{\mathrm{R}}}{330\,\Omega}$$

با توجه به قانون حلقه رابطه $V_R = 3V - V_D$ را می توان بیان کرد. در نتیجه جریان در دیود برابر با رابطه زیر قابل بیان است.

$$i = \frac{3\,\mathrm{V} - v_{\mathrm{D}}}{330\,\Omega}$$

پاسخ بالا را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

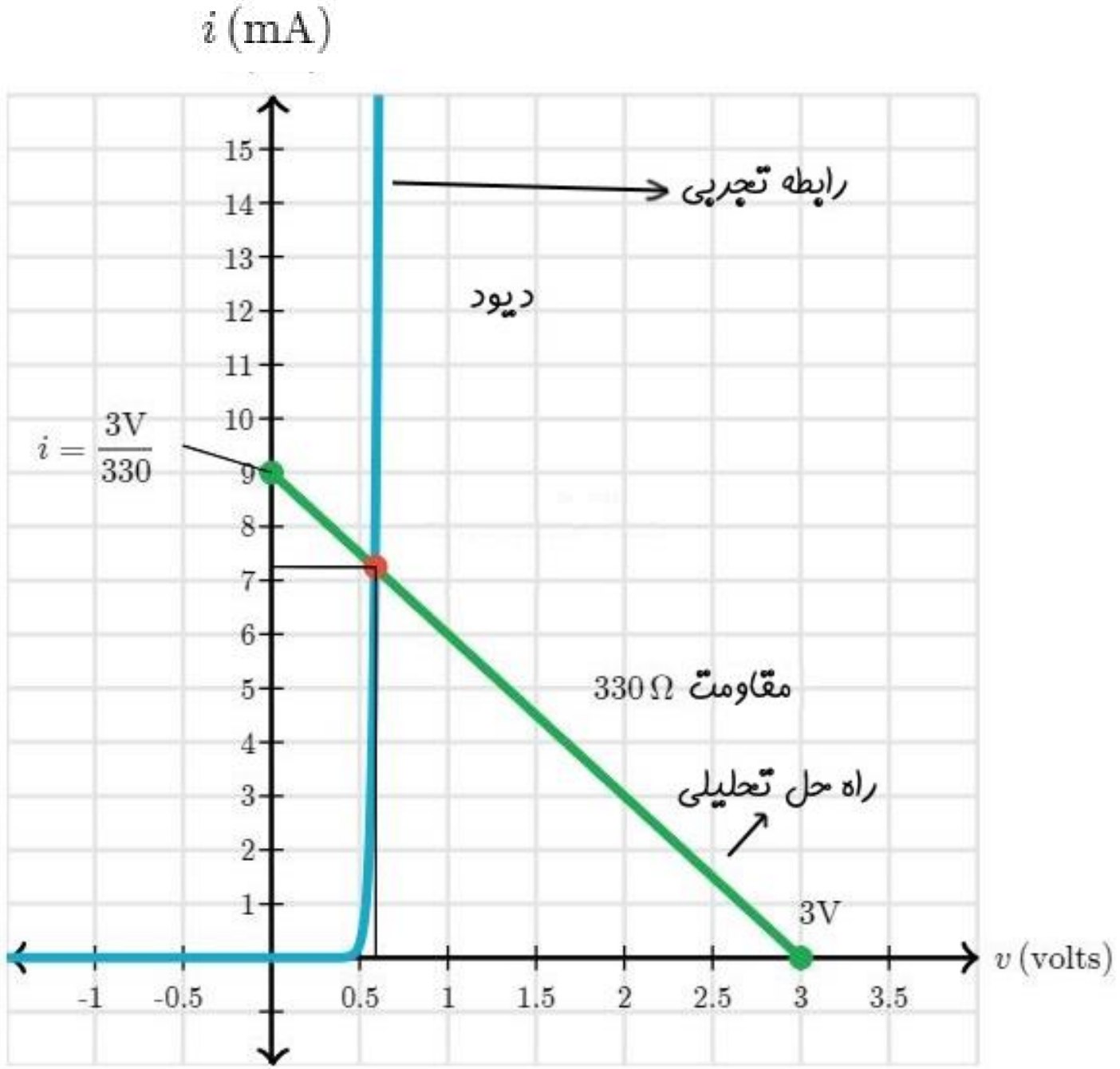
$$i = -\frac{1}{330\,\Omega}\,v_{\mathrm{D}} + \frac{3\,\mathrm{V}}{330\,\Omega}$$

بنابراین رابطه بین ولتاژ و جریان به صورت خطی بدست آمد. از طرفی در بالا رابطه بین ولتاژ و جریان را در یک دیود، بصورت نمایی بیان کردیم. در نتیجه می توان دو رابطه زیر را برای جریان و ولتاژ دیود بیان کرد:

$$i = -\frac{1}{330\,\Omega}\,v_{\mathrm{D}} + 9\,\mathrm{mA}$$

$$i = \mathrm{I_S}\,(\,e^{v_{\mathrm{D}}/26\,\mathrm{mV}} - 1)$$

از این رو بایستی این دو رابطه، را رسم و محل تلاقی آن‌ها را بدست آورد. در شکل بعد این کار انجام شده است.


$i\,(\mathrm{mA})$
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
رابطه تجربی
دیود
$i = \frac{3\mathrm{V}}{330}$
$330\,\Omega$ مقاومت
راه حل تحلیلی
3V
$v\,(\mathrm{volts})$
-1
-0.5
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5

محل تلاقی، ولتاژ و جریان دیود، برابر با مقادیر زیر بدست می‌آیند.

$$v_{\mathrm{D}} = 0.6\,\mathrm{V} \text{ and } i = 7.2\,\mathrm{mA}$$

Zener diode
(دیود زنر)

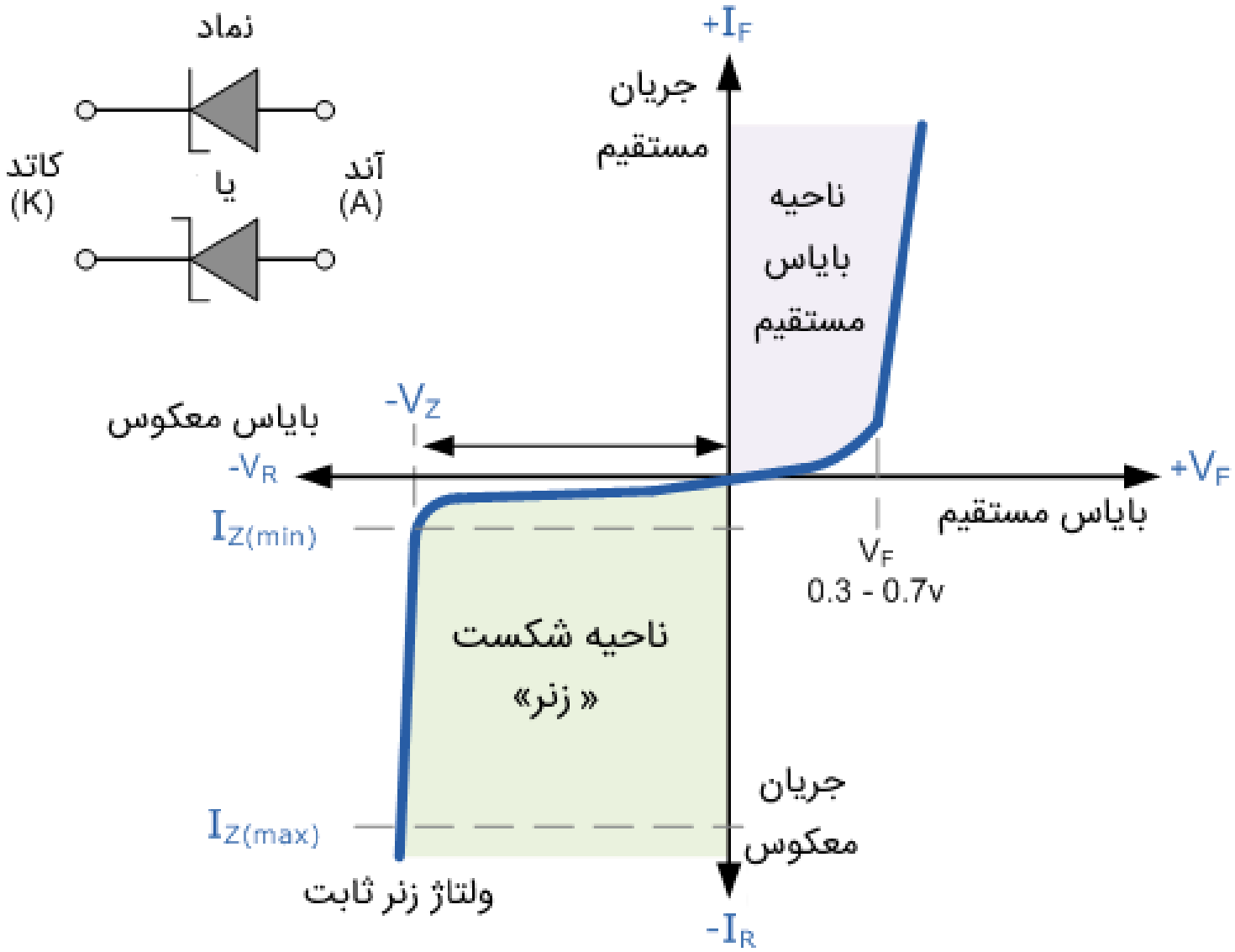
دیود زنر نوع خاصی از دیود است که برخلاف دیودهای عادی، جریان را در دو جهت عبور می دهد. این دیود، قلب تنظیم کننده‌ها و مدارهای ولتاژ است و ولتاژ مرجع تقویت کننده تفاضلی را تولید می کند. ویژگی اصلی یک دیود زنر، هدایت جریان در دو جهت است.
دیود اساساً از دو نیمه هادی تشکیل شده که به یکدیگر متصل شده‌اند. مشخصات این دو نیمه هادی با هم متفاوت است؛ یکی از آن‌ها فاقد الکترون بوده یا به تعبیری بار مثبت یا حفره اضافه دارد (نیمه هادی نوع p) و دیگری دارای الکترون اضافه (نیمه‌هادی نوع n) است. با اتصال این دو نیمه‌هادی به یکدیگر، یک پیوند PN داریم و به این ترتیب، الکترون‌ها و حفره‌ها قابل انتقال هستند.

دیود زنر دیودی است که به طور خاص برای کار در بایاس معکوس مورد استفاده قرار می گیرد. این نوع دیود، برای کار در ناحیه شکست زنر طراحی شده است. دیود زنر که در شرایط بایاس مستقیم مانند یک دیود عادی عمل می‌کند، نسبت به دیود عادی، آلاییده است (ناخالصی دارد). بنابراین، یک ناحیه تخلیه بسیار نازک دارد و به همین دلیل، جریان الکتریکی بیشتری نسبت به دیودهای عادی از خود عبور می‌دهد. تفاوت دیود زنر با دیود معمولی این است که دیود زنر، با ورود به ناحیه شکست، آسیبی نمی بیند.

اگر دیود زنر بایاس مستقیم شود، مانند یک دیود عادی، جریان را عبور می دهد، اما اگر بایاس معکوس شود و ولتاژ بایاس معکوس، بیشتر از ولتاژ زنر باشد، جریان را در خلاف جهت عادی هدایت می کند. دیود زنر همیشه در جهت عکس وصل می شود، زیرا به طور ویژه برای کار در جهت معکوس طراحی شده است.
ولتاژ شکست یک دیود زنر، با کنترل سطح آلاییدگی توسط سازنده و با دقت تنظیم می‌شود. این نوع دیود، به افتخار فیزیکدان آمریکایی، «کلارنس ملوین زنر» (Clarence Melvin Zener) که اثر زنر را کشف کرد، نامگذاری شده است. دیودهای زنر، از اجزای اصلی مدارهای الکترونیکی هستند و برای **محافظت مدار از اضافه ولتاژ** نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند.
ولتاژ شکست زنر یک دیود زنر، به مقدار ناخالصی آن بستگی دارد. اگر دیود شدیداً آلاییده باشد، شکست زنر در ولتاژهای معکوس پایین رخ می دهد. از سوی دیگر، در دیود با ناخالصی کم، شکست زنر در ولتاژهای معکوس بالاتر رخ می دهد. دیودهای زنر، در ولتاژهای 1.8 تا 400 ولت موجود هستند.

مشخصه ولتاژ - جریان دیود زنر

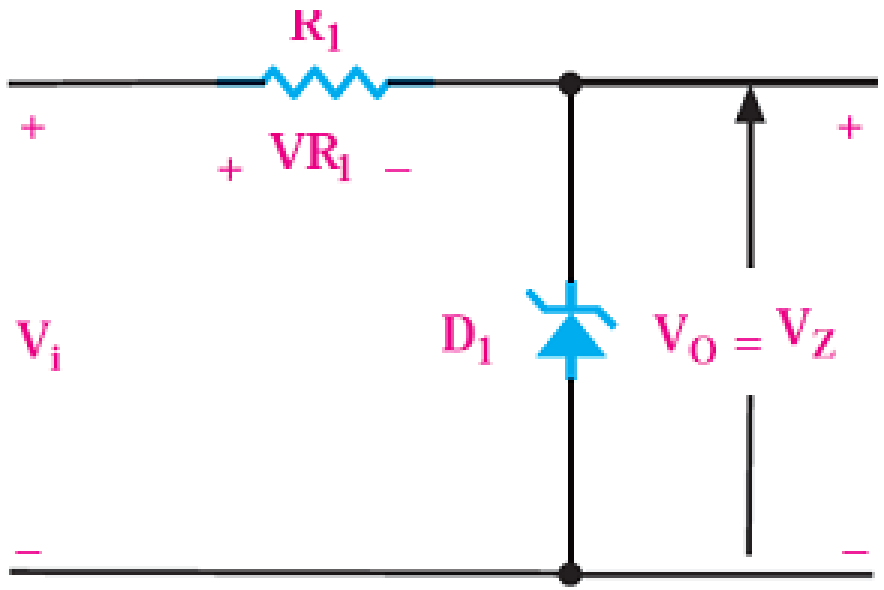
مشخصه V-I یک دیود زنر در شکل بعد نشان داده شده است. وقتی ولتاژ بایاس مستقیم به دیود زنر اعمال می‌شود، مانند یک دیود عادی عمل می کند. اما اگر ولتاژ بایاس معکوس به آن اعمال کنیم، عملکرد آن دیگر مانند دیود معمولی نخواهد بود.


نماد
کاتد
(K)
یا
آند
(A)
+I_F
جریان
مستقیم
ناحیه
بایاس
مستقیم
بایاس معکوس
-V_Z
-V_R
+V_F
$I_{Z(min)}$
بایاس مستقیم
V_F
0.3 - 0.7v
ناحیه شکست
« زنر»
جریان
معکوس
$I_{Z(max)}$
ولتاژ زنر ثابت
-I_R

همان گونه که منحنی مشخصه بالا پیداست، با اعمال ولتاژ بایاس معکوس، تا وقتی که ولتاژ کمتر از ولتاژ زنر باشد، یک مقدار کم جریان نشتی عبور خواهد کرد. هنگامی که ولتاژ به ولتاژ زنر برسد، دیود به مقادیر بالای جریان اجازه عبور خواهد داد. در این نقطه، یک افزایش کوچک در ولتاژ، موجب افزایش جریان ناگهانی خواهد شد.
همان گونه که می بینیم، در محدوده جریان‌های IZ(min) تا IZ(max) ولتاژ تقریباً ثابت است. از این قابلیت کنترلی دیود زنر، برای تنظیم یا پایدارسازی منابع ولتاژ در برابر تغییرات بار یا منبع استفاده می‌شود. نقش یک تنظیم کننده، فراهم کردن یک ولتاژ خروجی ثابت برای بار موازی با آن است.
در دیود زنر، جریان الکتریکی از هر دو سمت آند به کاتد و کاتد به آند عبور می کند. همان طور که می بینیم، نماد دیود زنر، شبیه دیود معمولی است، با این تفاوت که خط عمودی آن، در دو انتها خم شده است.

تنظیم ولتاژ با دیود زنر

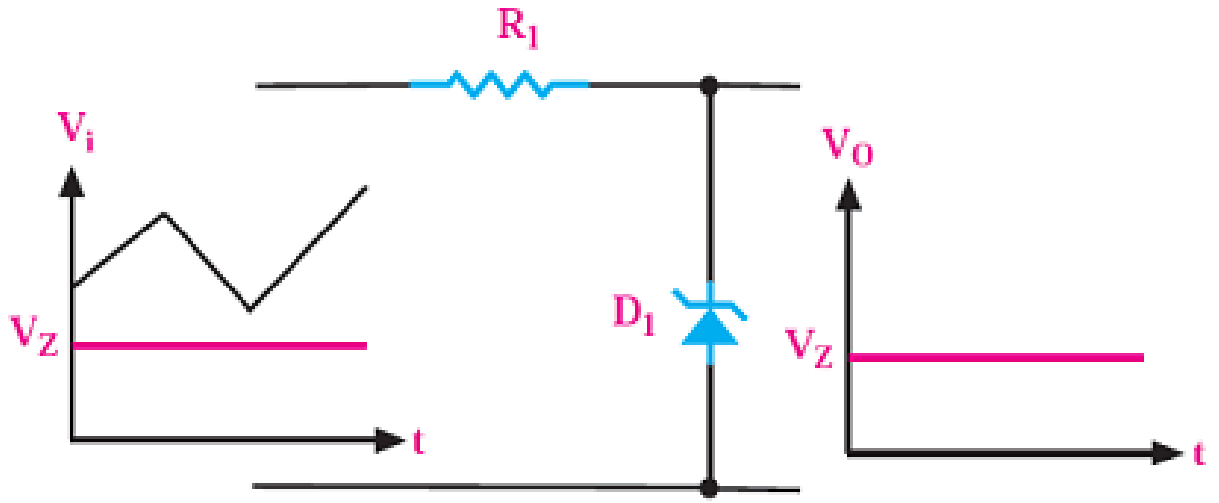
همان طور که گفتیم، می‌توان از دیود زنر به عنوان پایدارساز یا تنظیم کننده ولتاژ با ریپل کم در شرایط تغییرات جریان بار استفاده کرد. شکل زیر، یک تنظیم کننده دیود زنر را نشان می دهد. با عبور یک جریان کوچک مربوط به منبع ولتاژ مقاومت محدود کننده R1 دیود زنر جریان کافی را برای نگه داشتن ولتاژ Vo هدایت می‌کند.



در این مدار، رابطه زیر برقرار است:

$$V_i = V_R + V_z$$

مقدار Vz تقریباً ثابت است. اگر V1 افزایش یابد، V_R نیز زیاد می شود. بنابراین، تغییرات ولتاژ ورودی، به جای آنکه به خروجی منتقل شود، در مقاومت نمود پیدا می کند. شکل زیر، ولتاژ ورودی و خروجی مدار تنظیم ولتاژ را نشان می‌دهد.



مزایای دیود زنر

- ظرفیت توان بسیار بالا
- دقت زیاد
- اندازه کوچک
- هزینه پایین

کاربردهای دیود زنر

- معمولاً به عنوان مرجع ولتاژ استفاده می‌شوند.
- در پایدارسازهای ولتاژ یا تنظیم کننده‌های شنت مورد استفاده قرار می گیرند.
- در عملیات کلید زنی (سوئیچینگ) استفاده می شوند.
- در مدارهای برشگر به کار می روند.
- در مدارهای حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.