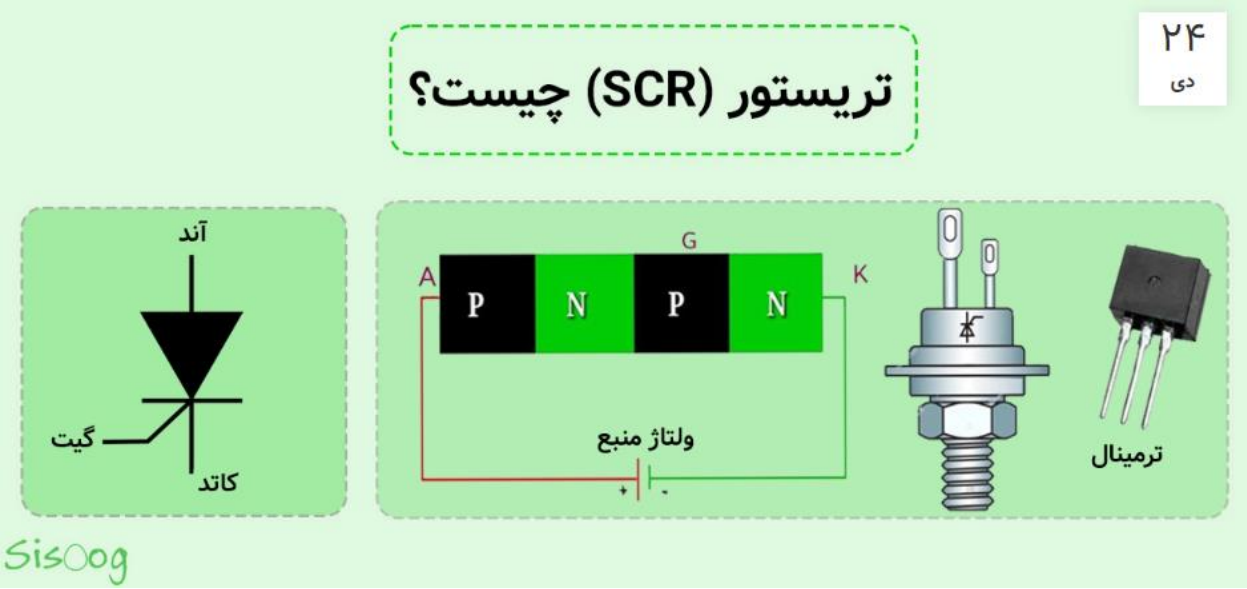
تریستور چیست و چه‌کار می‌کند؟ + معرفی انواع تریستور



تریستور (SCR) یک قطعه نیمه‌هادی است که عمل سوئیچ و همچنین یک‌سوسازی را انجام می‌دهد.

تریستور چیست؟

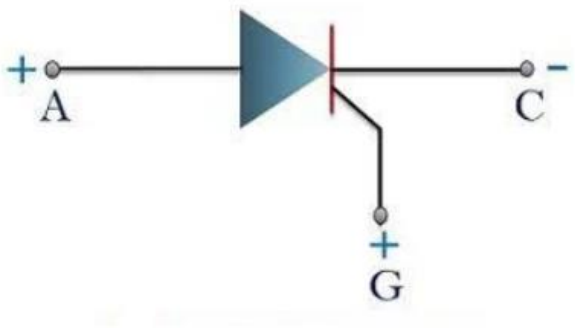
تریستور (SCR) یک قطعه نیمه‌هادی است که عمل سوئیچ و همچنین یک‌سوسازی را انجام می‌دهد. تریستور قطعه‌ای چهارلایه و با سه اتصال است که از ترکیب نیمه‌هادی‌های p و n تشکیل شده است.

واژه Thyristor از ادغام بخش ابتدایی کلمه thyratron تیراترون و بخش پایانی کلمه transistor ترانزیستور به وجود آمده است. در واقع، واژه تریستور عملکرد یک‌سوسازی تیراترون و همچنین کنترل‌پذیری ترانزیستور را نشان می‌دهد. تریستور یک قطعه با سه ترمینال یعنی آند (Anode)، کاتد (Cathode) و گیت (Gate) است. برای هدایت الکتریکی، پالس تریگر گیت ضروری است. تک‌جهته بودن ویژگی اصلی تریستور است. این بدان معنی است که تریستور جریان را فقط در یک‌جهت هدایت می‌کند.

تریستورها در انواع مختلفی وجود دارند و یکسوکننده کنترل‌شده سیلیکونی (Silicon Controlled Rectifier) یا SCR مهم‌ترین عضو خانواده تریستورها است؛ بنابراین، SCR به‌طورکلی به‌عنوان یک تریستور شناخته می‌شود.

نماد تریستور

شکل زیر نماد یک تریستور (SCR) را نشان می‌دهد.

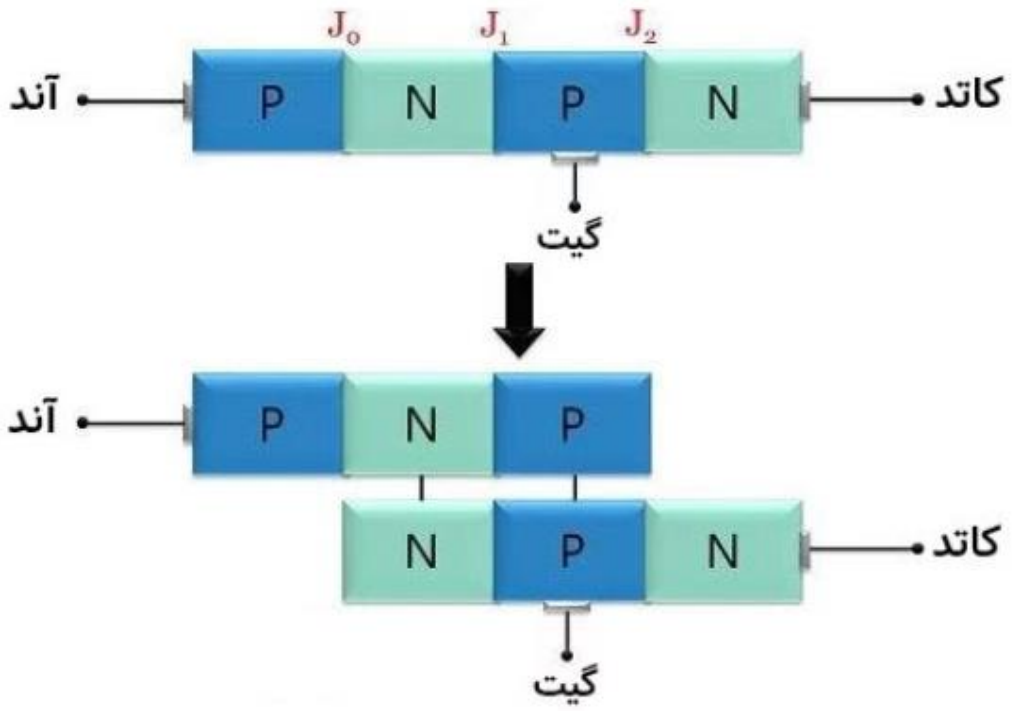


همان‌طور که می‌بینیم، نماد تریستور تقریباً شبیه یک دیود معمولی است، اما تنها تغییر موجود در اینجا وجود یک ترمینال گیت است که برای راه‌اندازی مدار استفاده می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفتیم، این قطعه سه ترمینال دارد که شامل ترمینال آند، ترمینال کاتد و ترمینال گیت است.

طرز کار تریستور

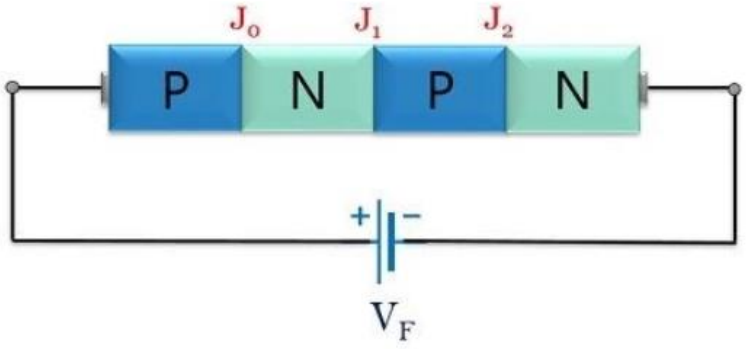
یک تریستور (SCR) از دو نیمه‌هادی نوع p و دو نیمه‌هادی نوع n تشکیل شده است که در نتیجه ساختار چهارلایه را ایجاد می‌کند.

شکل زیر مقایسه دو ترانزیستور را نشان می‌دهد و با آن می‌توانیم یک‌شکل ساده تریستور را شرح دهیم.



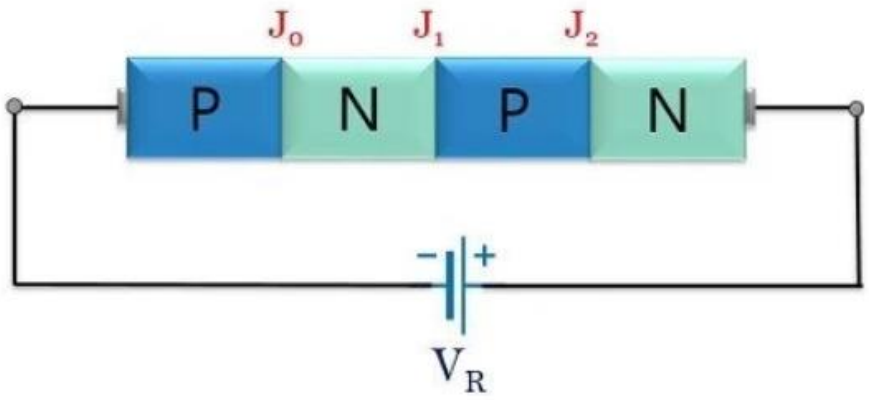
شکل بالا به‌وضوح نشان می‌دهد که کلکتور اولین پیکربندی ترانزیستور به‌عنوان بیس برای ترانزیستور دوم عمل می‌کند. به طور مشابه، کلکتور پیکربندی دوم تریستور به‌عنوان بیس اولی عمل می‌کند.

در این پیکربندی سه حالت عملکرد وجود دارد. هنگامی که ترمینال آند به قطب مثبت باتری وصل می‌شود و کاتد با ترمینال منفی باتری ارتباط برقرار می‌کند، پیوندهای J0 و J2 بایاس مستقیم می‌شوند، اما درعین‌حال این بایاس مستقیم باعث بایاس معکوس پیوند J1 می‌شود. شکل زیر این اتصال مستقیم را به‌وضوح نشان می‌دهد.



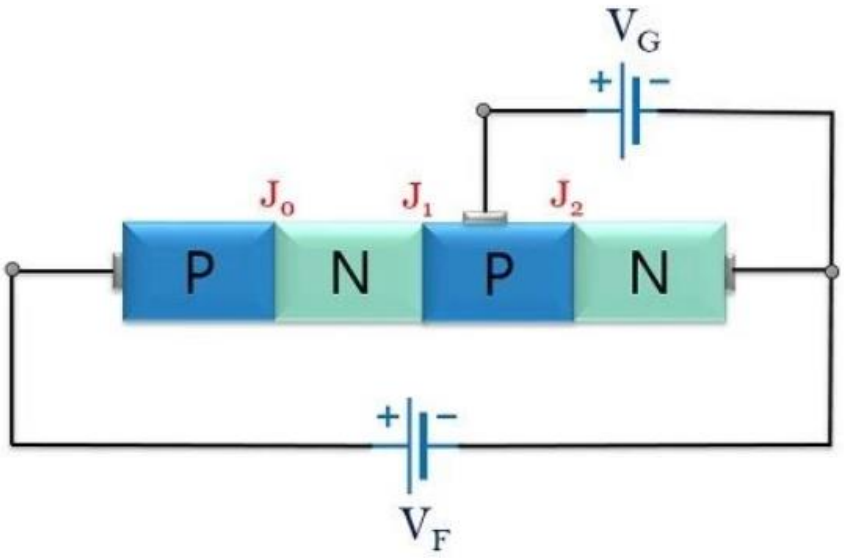
بایاس مستقیم J0 و J2 امکان حرکت حامل‌ها را فراهم می‌کند. اما پیوند میانی J1 به دلیل پتانسیل اعمال‌شده معکوس، یک ناحیه تخلیه گسترده ایجاد می‌کند و جریان حامل‌های اکثریت از طریق آن را مسدود می‌کند. بااین‌حال، یک جریان نشتی بسیار کوچک به دلیل حرکت حامل‌های اقلیت برقرار می‌شود. اما این جریان برای به درایو کردن مدار کافی نیست؛ بنابراین، با وجود ولتاژ مستقیم، قطعه جریان را عبور نمی‌دهد. این حالت به‌عنوان حالت سدکنندگی مستقیم (forward blocking mode) یا حالت خاموش شناخته می‌شود.

شرایط بعدی زمانی ایجاد می‌شود که ترمینال آند تریستور به ترمینال منفی باتری و کاتد به ترمینال مثبت باتری متصل شود.



این امر باعث می‌شود که J0 و J2 بایاس معکوس شوند، اما درعین‌حال به دلیل چنین منبعی، J1بایاس مستقیم می‌شود؛ بنابراین، بایاس معکوس J0 و J2 اجازه نمی‌دهد که جریان عبور کند. ازاین‌رو، مقدار بسیار کمی جریان معکوس، یعنی جریان نشتی، از قطعه عبور می‌کند. این حالت به‌عنوان سدکنندگی معکوس یا حالت خاموش شناخته می‌شود.

اما حالت عملکرد واقعی تریستور زمانی ایجاد می‌شود که یک پالس گیت خارجی به آن داده شود. در این حالت، ولتاژ مثبت کافی به آند و گیت در مقایسه با کاتد داده می‌شود.



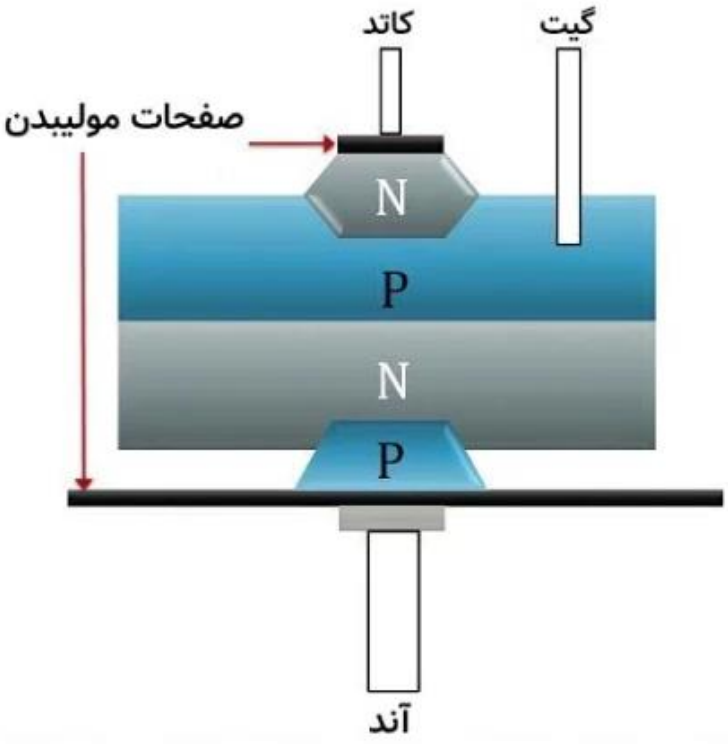
در شکل بالا به‌وضوح می‌بینیم که یک ولتاژ مستقیم به ترمینال گیت نسبت به ترمینال کاتد داده می‌شود. اکنون، در این حالت، پیوندهای J0، J1 و J2 همگی در شرایط بایاس مستقیم قرار می‌گیرند؛ بنابراین، حامل‌های اکثریت شروع به حرکت به سمت کلکتور ترانزیستور Q1 می‌کنند و همان‌طور که می‌دانیم کلکتور Q1 با بیس ترانزیستور Q2 ارتباط برقرار می‌کند. این جریان بیس ترانزیستور Q2 را روشن می‌کند. همچنین، محل اتصال بایاس مستقیم است، بنابراین حامل‌های اکثریت به سمت کلکتور Q2 حرکت می‌کنند. به‌این‌ترتیب، جریان زیادی از قطعه عبور می‌کند؛ بنابراین، با اعمال پالس تریگر گیت، جریان الکتریکی زیادی از تریستور عبور می‌کند. این حالت به‌عنوان حالت هدایت مستقیم (forward conduction mode) شناخته می‌شود. اکنون، حتی اگر ولتاژ گیت را حذف کنیم، این عمل تجمعی نیز انجام می‌شود و پس از رسیدن به مقدار حداقل، جریان از تریستور عبور می‌کند. این حداقل جریان به‌عنوان جریان چفتی یا قفلی (latching current) شناخته می‌شود.

حال این سؤال مطرح می‌شود که برای خاموش‌شدن تریستور پس از روشن‌شدن چه باید کرد؟ پاسخ این سؤال کاهش جریان آند تا کمترین مقدار آن (جریان نگهدارنده) است؛ بنابراین، کاهش ولتاژ آند، تریستور را دوباره به حالت سدکنندگی مستقیم می‌برد.

ساختار تریستور

تریستور یک قطعه چهارلایه و با سه پیوند یا اتصال است که عمدتاً از سیلیکون به‌عنوان ماده اصلی تشکیل شده است. ساختار تریستور تقریباً شبیه یک ترانزیستور معمولی است، اما برخلاف ترانزیستور از چهارلایه تشکیل شده است. می‌توان گفت که تریستور از اتصال پشت‌به‌پشت دو ترانزیستور با پیکربندی‌های مختلف (یک ترانزیستور PNP و یک ترانزیستور NPN) تشکیل می‌شود.

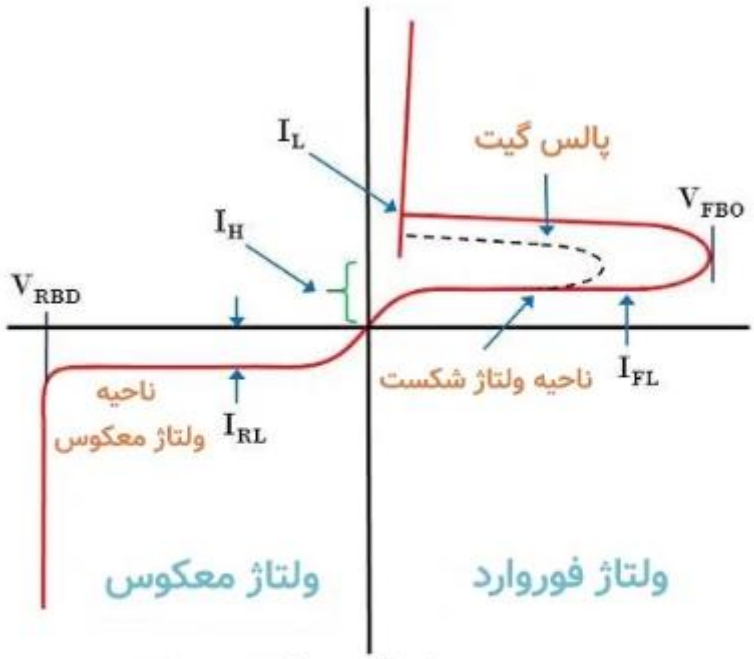
شکل زیر ساختار تریستور دارای چهارلایه یعنی P-N-P-N را نشان می‌دهد.



در شکل بالا، پایین‌ترین ناحیه p آند را نشان می‌دهد و ناحیه بالای n ترمینال کاتد است. این دو ناحیه با کمک صفحات مولیبدن (Molybdenum) با ترمینال کاتد و آند ارتباط برقرار می‌کنند. ازاین‌رو، به یک ساختار چهارلایه‌ای متشکل از سه پیوند می‌رسیم. همان‌طور که قبلاً گفتیم، تریستور یک قطعه سوئیچ است و می‌دانیم که یک قطعه سوئیچ باید جریان نشتی بسیار کمی داشته باشد. سیلیکون مقدار جریان نشتی کمتری نسبت به ژرمانیوم نشان می‌دهد، بنابراین در ساخت SCR از آن استفاده می‌شود.

منحنی مشخصه تریستور

شکل زیر منحنی مشخصه تریستور را نشان می‌دهد.



شکل بالا سه ناحیه عملکرد تریستور را نشان می‌دهد. باتوجه‌به ولتاژ اعمال شده مستقیم در ابتدا که یک پالس تریگر گیت اعمال نمی‌شود، قطعه در ناحیه سدکنندگی مستقیم عمل می‌کند. اما، هنگامی که پالس تریگر گیت با ولتاژ مستقیم اعمال می‌شود، جریان زیادی از تریستور عبور می‌کند. این حالت نشان‌دهنده ناحیه هدایت مستقیم است.

زمانی که ولتاژ معکوس می‌شود، تنها جریان نشتی معکوس از تریستور عبور می‌کند. اما پس از یک ولتاژ معکوس مشخص، تریستور دچار شکست بهمنی می‌شود و این ولتاژ را ولتاژ شکست معکوس (reverse breakdown voltage) تریستور می‌نامند.

مشخصات استاتیک تریستور

مشخصه‌های استاتیک زیر را برای تریستور می‌توان بیان کرد:

1. تریستور یک قطعه کنترل‌شده با جریان است. در واقع، جریان زیاد آند توسط مقدار کم جریان گیت کنترل می‌شود.
2. پس از اعمال یک پالس تریگر، تریستور به‌عنوان یکسوکننده عمل می‌کند.
3. حتی اگر پالس تریگر اعمال شود، تریستور در حالت بایاس معکوس هدایت نمی‌کند.
4. اگر جریان آند یک‌بار از جریان قفلی فراتر رود، حذف پالس گیت تریستور را قطع نمی‌کند.
5. عبور جریان مناسب از طریق تریستور تنها زمانی انجام می‌شود که جریان آند از جریان نگهدارنده بیشتر شود.

اصطلاحات مرتبط با تریستور

- **جریان چفتی (Latching current)** : جریان چفتی حداقل جریانی است که در حالت بایاس مستقیم از تریستور عبور می‌کند. هنگامی که جریان به این مقدار خاص برسد، تریستور حتی پس از حذف پالس گیت هدایت را به طور کامل آغاز می‌کند. این جریان با فرایند روشن‌شدن تریستور مرتبط است. مقدار آن تا حدودی دو یا سه برابر جریان نگهدارنده است.
- **جریان نگهدارنده (Holding current)** : جریان نگهدارنده حداقل جریانی است که در حالت مستقیم از تریستور عبور می‌کند، اما کمتر از این مقدار خاص، تریستور هدایت را متوقف می‌کند. این جریان مربوط به خاموش‌کردن فرایند تریستور است.

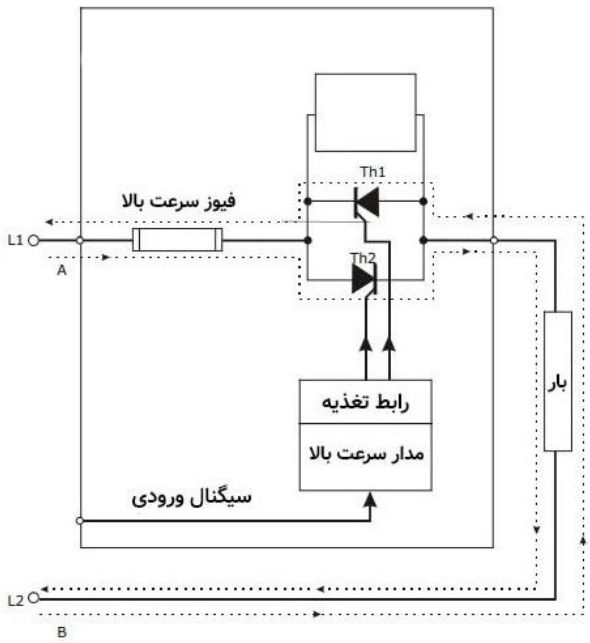
تریستورها به دلیل عملکرد سوئیچینگ و قابلیت یکسوکنندگی خود از قطعات نیمه‌هادی قدرت پرکاربرد هستند. این قطعات عمدتاً در سیستم‌های رله و کنترل فاز استفاده می‌شوند.

مدار تریستور

SCR یک قطعه نیمه‌رسانا است که به‌عنوان کلیدی عمل می‌کند که توسط دو تریستور به‌صورت پادموازی تشکیل شده است. هر تریستور مانند یک شیر یک‌طرفه است که فقط زمانی می‌تواند هدایت کند که شرایط جدول زیر را داشته باشد:

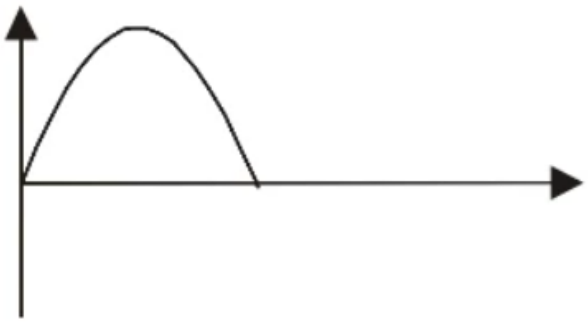
سیگنال گیت	آند	وضعیت
ON	+	رسانایی
ON	-	نارسانایی
OFF	-	

برای ساخت یک کلید واقعی برای جریان متناوب لازم است از دو تریستور به‌صورت پادموازی استفاده شود. به یاد داشته باشید که تریستور با منبع تغذیه ولتاژ DC کار نمی‌کند. تریستوری که در حال رسانایی است تا زمانی که ولتاژ به صفر می‌رسد متوقف نمی‌شود. همچنین، تا سیگنال گیت را پس از روشن‌کردن آن حذف نکنیم، تریستور خاموش نمی‌شود. در ادامه، نحوه عملکرد تریستور را بررسی می‌کنیم. مدار شکل زیر را در نظر بگیرید.

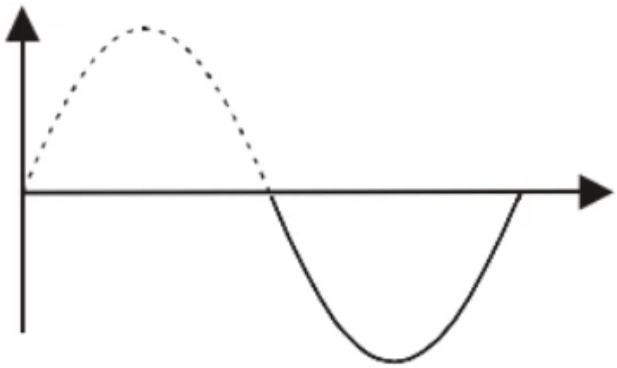


وقتی سیگنال گیت اعمال شود، دو حالت خواهیم داشت.

وقتی L1 مثبت است، جریان در جهت عکس A برقرار است و تریستور Th1 جریان را عبور می‌دهد.

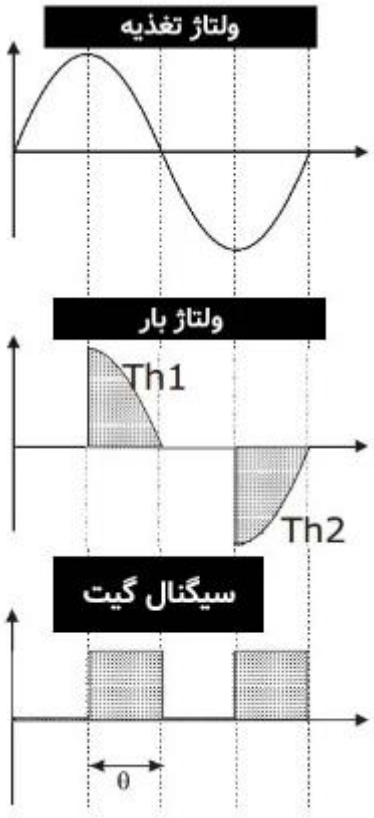


وقتی L1 منفی باشد، جریان در جهت عکس مسیر B عبور می‌کند و تریستور Th2 جریان را عبور می‌دهد. اگر واحد تریستور را با یک کلید مقایسه کنیم، در این شرایط روشن است.



وقتی سیگنال گیت اعمال نشود، هر دو تریستور جریان را عبور نمی‌دهند و اگر واحد تریستور را با یک سوئیچ مقایسه کنیم، در این حالت خاموش است.

تصویر زیر، خلاصه عملکرد تریستور را برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.



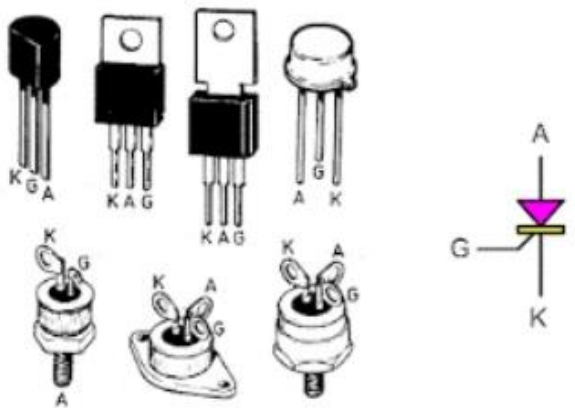
انواع تریستور

قطعاتی که در خانواده تریستورها قرار می‌گیرند، در شکل زیر نشان داده شده‌اند. در ادامه، مهم‌ترین این انواع را اجمالاً معرفی می‌کنیم.

TRIAC از دو SCR تشکیل شده که به‌صورت پادموازی با یک ترمینال گیت مشترک متصل شده‌اند. این قطعه می‌تواند در هر دو جهت هدایت کند و برای کنترل فاز در کاربردهای AC استفاده می‌شود. ترایاک ترمینال آند و کاتد ندارد و می‌توان از آن در هر جهتی استفاده کرد. این قطعه با اعمال پالس گیت مثبت و منفی روشن می‌شود. هنگامی که TRIAC به منبع AC متصل می‌شود، یک پالس گیت مثبت قطعه را برای نیم چرخه و یک پالس گیت منفی برای نیم چرخه دیگر راه‌اندازی می‌کند.

GTO مانند هر SCR معمولی با اعمال ولتاژ گیت مثبت روشن می‌شود. بااین‌حال، می‌توان آن را با اعمال ولتاژ گیت منفی خاموش کرد. این قطعه برای حفظ حالت هدایت خود به حداقل 1% از پالس روشن نیاز دارد.

در حال حاضر بسته به کاربرد، انواع مختلفی از SCR وجود دارد که مشخصات یا شرایط متفاوتی نیز دارند.



اشکال SCRs

می‌توانیم تریستورها را به دودسته زیر تقسیم کنیم:

- آن‌هایی که می‌تواند جریان ۰/۸ تا ۲۰۰۰ آمپر را تحمل کند.
- آن‌هایی که از ولتاژ ۲۲۰ ولت تا ۱۰۰۰ ولت و... را تحمل می‌کنند.

و به‌طورکلی، تریستورها را بر اساس کاربرد آن‌ها، می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

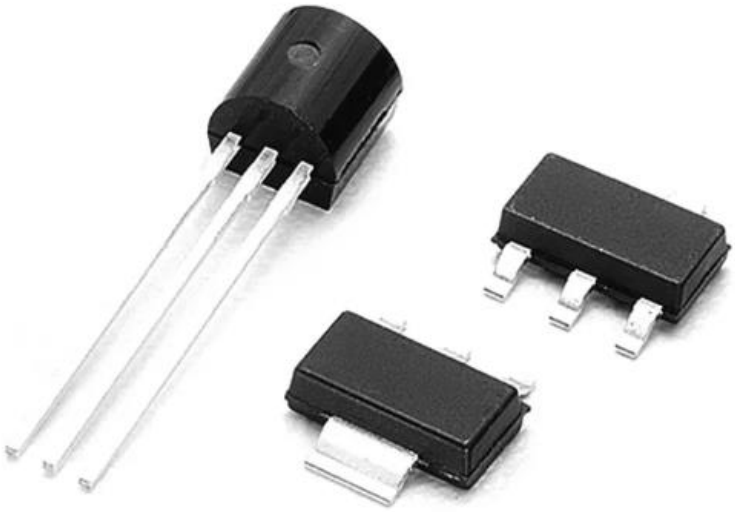
- تریستور روشن شونده (کنترل یک‌طرفه)
- تریستور خاموش شونده (کنترل یک‌طرفه)
- تریستور هدایت‌شونده (کنترل دوطرفه)

در ادامه به بررسی این تریستورها می‌پردازیم.

انواع تریستورهای روشن شونده

انواع تریستورهای روشن شونده عبارت‌اند از:

- **یک‌سوساز کنترل‌شونده با سیلیکون (SCR)**



این نوع تریستورها حتی وقتی جریان گِیت قطع می‌شود، باز هم روشن می‌مانند و برای خاموش‌شدن آن‌ها، باید جریان آند به کاتد حذف یا آند از طریق ولتاژ منفی مرتبط با کاتد، ریست شود؛ این ویژگی برای کنترل فاز بسیار مناسب است.

- **تریستور اتصال معکوس (RCT)**

- تریستورها اغلب به جریان اجازه جلو رفتن می‌دهند، درحالی‌که جریان معکوس را مسدود می‌کنند. اما تریستور RCT از یک SCR ساخته شده است که با دیود معکوس یکپارچه می‌شود و انتقال جریان در جهت معکوس را ممکن می‌سازد. RCTها در مبدل‌ها و درایوهای DC پر قدرت کاربرد دارند.
- **یک‌سوساز سیلیکونی کنترل‌شونده با نور (LASCR)**

این نوع با نام تریستور فعال شونده با نور (LTT) نیز شناخته می‌شود. در این تریستورها، ذرات نوری به نقطه اتصال بایاس معکوس برخورد کرده و تعداد زوج‌های الکترون/حفره را در تریستور افزایش می‌دهد. تریستورهای LASCR در تجهیزات انتقال ولتاژ زیاد DC، متعادل‌کننده برق و ژنراتورهای پالس‌های پرقدرت کاربرد دارند.

انواع تریستورهای خاموش شونده

انواع تریستورهای خاموش شونده عبارت‌اند از:

- **تریستور گِیت خاموش شونده (GTO)**

این نوع تریستورهای خاموش شونده با سایر تریستورهای استاندارد متفاوت هستند، چرا که با اعمال جریان منفی (ولتاژ) به گیت خاموش می‌شوند، حتی اگر جریان بین آند و کاتد حذف نشود.

در بازار انواع مختلفی از تریستورهای GTO نامتقارن وجود دارد که تنوع بیش‌تری نسبت به نوع متقارن دارند. به‌صورت کلی، از GTOها در موتور درایورهای AC و DC و معکوس‌کننده‌های توان بالا استفاده می‌شود.

- **تریستورهای خاموش شونده MOS یا (MTO)**

MTOها ترکیبی از یک GTO و یک ماسفت هستند تا خاموش شدن GTOها را آسان تر کنند .MTO دارای دو ترمینال کنترل است: گِیت روشن شدن و گِیت خاموش شدن که به آن گیت ماسفِت نیز گفته می شود .

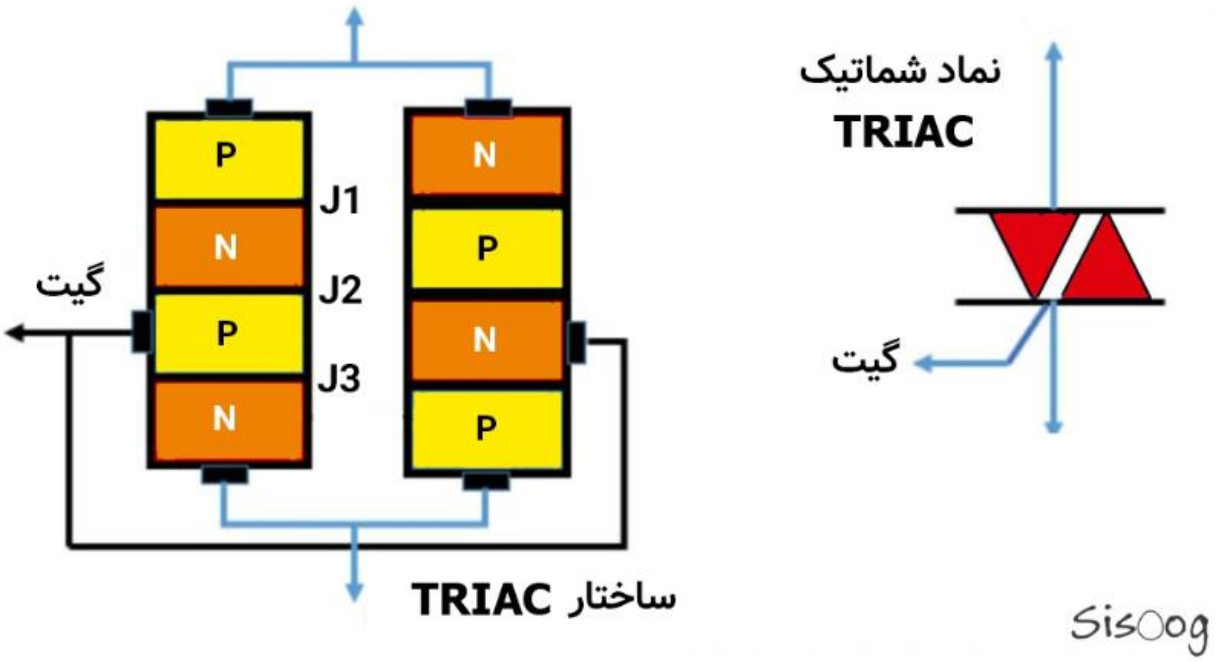
- **تریستورهای خاموش شونده امیتر (ETO)**

ETOها هم مثل MTOها، دارای دو ترمینال هستند که یکی معمولی و دیگری به حالت سری به یک ماسفِت متصل شده است. برای روشن‌کردن ETO، باید ولتاژ مثبت به هر دو گیت وارد شود تا NMOS روشن شده و PMOS خاموش شود.

انواع تریستورهای هدایت‌شونده

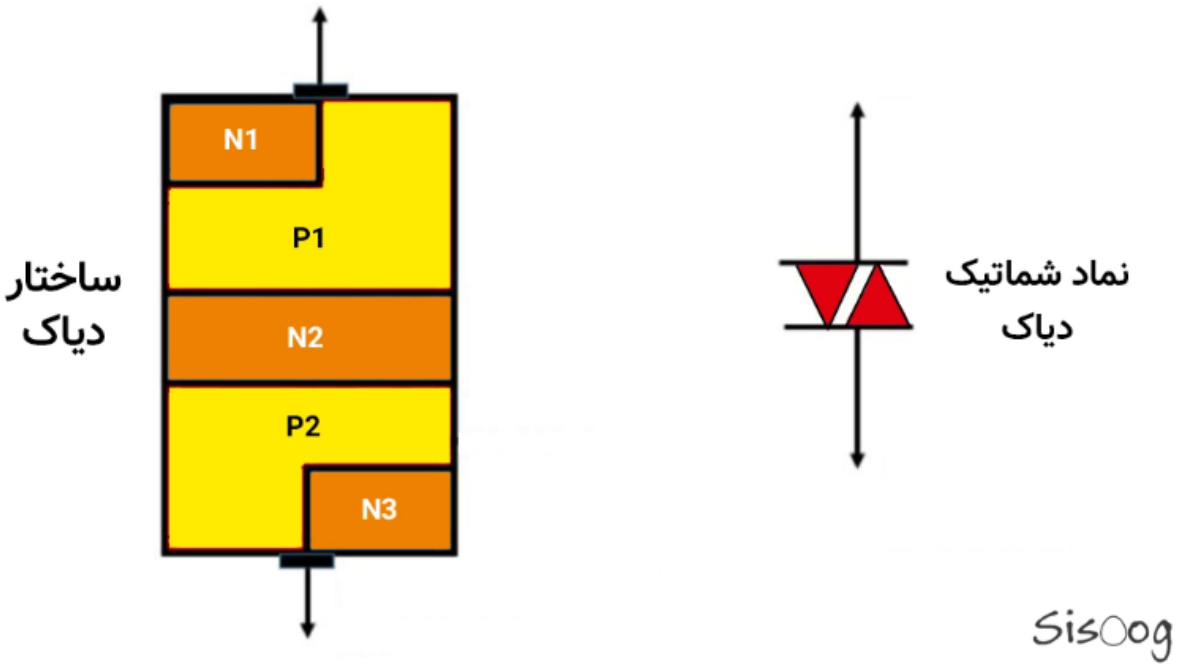
انواع تریستورهای هدایت‌شونده عبارت‌اند از:

- **تریود جریان متناوب (TRIAC)**



بعد از SCRها، تریستورهای TRIACها پرکاربردترین نوع تریستورها هستند. این نوع تریستور می‌تواند هر دونیمه امواج جریان متناوب را کنترل کند و از انرژی الکتریکی موجود بهترین بهره را بگیرد. ولی TRIACها اغلب در کاربردهای توان پایین استفاده می‌شوند، زیرا دارای ساختار نامتقارنی هستند.

- **دیود جریان متناوب (DIAC)**



DIACها مناسب برای توان‌های پایین هستند. به‌طورکلی، این تریستورها به‌صورت ترکیبی با TRIACها استفاده می‌شوند. با استفاده از DIAC می‌توان از هرگونه گردش جریان از گِیت TRIAC جلوگیری کرد تا DIAC به ولتاژ موردنظر برسد.

- **دیود سیلیکونی جریان متناوب (SIDAC)**

این نوع تریستورها از نظر الکتریکی مثل DIACها عمل می‌کنند. تفاوت اصلی تریستورهای DIAC و SIDAC این است که SIDACها ولتاژ مثبت آند بیش‌تری برای اتصال می‌فرستند و همچنین، دارای توانایی مدیریت انرژی الکتریکی بیش‌تری نسبت به DIACها هستند.

کاربردهای تریستور

- **در سیستم‌های کنترل :**تریستورها به طور گسترده در کنترل موتورهای ac و همچنین dc استفاده می‌شوند.
- **در خطوط انتقال :**استفاده از تریستورها در خطوط انتقال ضریب توان آن‌ها را بهبود می‌بخشد.
- **در کاربردهای سوئیچ :**ازآنجاکه تریستورها توانایی فوق‌العاده‌ای در تغییر حالت روشن و خاموش دارند، عمدتاً در کاربردهای سوئیچ از آن‌ها استفاده می‌شود.
- **در خطوط انتقال HVDC:** امروزه، تریستورها به بخش اساسی خطوط انتقال فشارقوی تبدیل شده‌اند.

جمع‌بندی

تریستور به‌عنوان یکی از عناصر مهم و کلیدی در حوزه الکترونیک قدرت و سیستم‌های سوئیچینگ مطرح است. این قطعه نیمه‌هادی به دلیل توانایی بالا در کنترل جریان‌های بزرگ و تحمل ولتاژهای بالا، نقش بسزایی در کاربردهای صنعتی و خانگی دارد. از جمله ویژگی‌های مهم تریستور می‌توان به عملکرد کارآمد، پایداری در شرایط سخت و توانایی سوئیچینگ سریع اشاره کرد که این ویژگی‌ها آن را برای کاربردهایی مانند مبدل‌های قدرت، کنترل موتورهای الکتریکی، تنظیم ولتاژ و مدارهای حفاظت مناسب می‌سازد.

البته تریستورها دارای محدودیت‌هایی نیز هستند؛ از جمله نیاز به مدارهای راه‌انداز و مدارهای محافظ جهت جلوگیری از آسیب در شرایط غیرعادی. اما به‌طورکلی، تریستورها با وجود این چالش‌ها، به دلیل قابلیت‌های منحصربه‌فردشان همچنان در سیستم‌های قدرت و کنترل جایگاه ویژه‌ای دارند و می‌توانند به بهبود کارایی و افزایش بهره‌وری در بسیاری از کاربردهای صنعتی کمک کنند.

منابع: Electronics Desk و Cd Automation