http://levinic.com

فصل ۲

عناصر نیمه هادی قدرت

۲-۱ مقدمه

نیمه هادی[1] ذاتی ماده‌ای است که مقاومت مخصوص آن بین هادیها و عایق‌ها قرار داردو با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد. ماده اصلی نیمه هادی که در وسایل الکترونیک قدرت بکار می‌رود سیلیکون است، یعنی ماده‌ای است که از نظر طبقه‌بندی بین عایق و هادی قرار دارد و مقاومت آن با افزایش حرارت کاهش می‌یابد. سیلیکون از عناصر گروه IV جدول تناوبی عناصر است یعنی اینکه در مدار خارجی ساختمان اتمی آن چهار الکترون وجود دارد. اگر عنصری از گروه V، نظیر فسفر، که در مدار خارجی آن پنج الکترون وجود دارد، به آن اضافه گردد، چهار الکترون از پنج الکترون فسفر با چهار الکترون سیلیکون تشکیل پیوند یا قید همظرفیتی[2] می‌دهند و در نتیجه در ساختمان کریستالی آن یک الکترون آزاد بوجود می‌آید. حضور این الکترون‌های اضافی باعث افزایش قابل ملاحظه هدایت سیلیکون می‌گردد. چون الکترون دارای بار منفی است، ماده‌ای که به این روش دارای ناخالصی می‌گردد، به نیمه هادی نوع N موسوم است.

اگر چنانچه عنصری از گروه III که دارای سه الکترون در مدار خارجی خود هستند، به عنوان ماده ناخالصی به سیلیکون اضافه شود، در شبکه کریستالی یک حفره[3] ایجاد می‌شود. ممکن است این حفره را متحرک در نظر گرفت زیرا می‌تواند با الکترون مجاور پرشود، که الکترون نیز به نوبه خود حفره‌ای را بجا می‌گذارد. بنابراین می‌توان حفره‌ها را به عنوان حامل‌های بار مثبت در نظر گرفت و نیمه هادی‌ای که به وسیله عناصر گروه III دارای ناخالصی می‌گردد به نیمه‌هادی نوع P موسوم است.

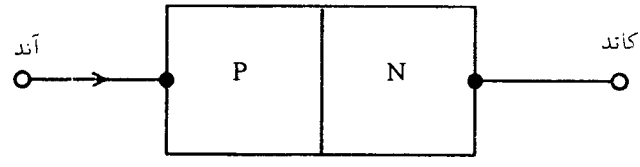
1-Semiconductor 2- Covalent bond 3- Hole

http://levinic.com

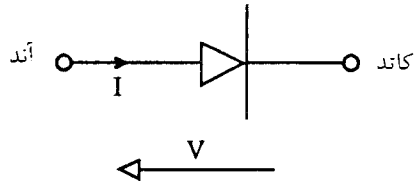
میزان وارد کردن ناخالصی به مقدار ۱ جزء در 10^7 اتم است. در نیمه هادی نوع N الکترون‌ها حامل‌های اکثریت[1] جریان و حفره‌ها حامل‌های اقلیت[2] هستند. عکس این مطلب در مورد نیمه هادی نوع P صادق است. بر حسب میزان ناخالصی قابلیت هدایت نیمه‌هادی نوع N و نوع P در مقایسه با سیلیکون خالص، بطور وسیعی افزایش می‌یابد.

۲-۲ دیود[3]

دیود ساده‌ترین عنصر یا وسیله نیمه‌هادی است که در الکترونیک قدرت مورد استفاده قرار می گیرد. دیود مطابق شکل ۲-۱ از پیوند نیمه‌هادی N و P بدست می‌آید. در محل پیوند[4]، الکترونهای آزاد N و حفره‌های آزاد P ترکیب شده و درنتیجه موجب می‌شوند که ماده نوع N در اطراف پیوند دارای بار مثبت و ماده نوع P در اطراف پیوند دارای بار منفی گردد. بنابراین در محل پیوند یک سد پتانسیل[5] به میزان ۰/۶V ایجاد می‌شود و یک ناحیه باریک خالی از حفره و الکترون بوجود می‌آید. سد پتانسیل حاصل باعث جلوگیری از حرکت الکترون‌ها و حفره‌ها گردیده و شرایط تعادلی برقرار می‌شود. (ناحیه‌ای که سد پتانسیل در دوسر آن قرار دارد به لایه تخلیه[6] یا لایه انتقال نیز موسوم است.) چنانچه ولتاژ خارجی با پلاریته مثبت یا منفی به آن اعمال گردد این شرایط تعادل خدشه‌دار می‌گردد. ولتاژ خارجی اعمال شده



(الف) ساختمان



(ب) علامت اختصاری

شکل ۲-۱ دیود

1- Majority carrier
2-Minority carrier
3- Diode
4- Junction
5- Potential barrier
6- Depletion layer

http://levinic.com

ممکن است به پتانسیل سد کمک نموده آنرا تقویت نماید و یا با آن مخالفت نموده آنرا از بین ببرد.

چنانچه ولتاژ معکوس - کاتدنسبت به آند مثبت است - بـه آن اعـمال شـود، مـیدان الکتریکی در ناحیه پیوند تقویت شده، پتانسیل سد افزایش می‌یابد و درنتیجه باعث رانده شدن الکترون‌ها و حفره‌ها از محل پیوند گردیده و از هدایت جلوگیری می‌شود و پیوند ولتاژ معکوس را تحمل می‌نماید. این حالت را بایاس (گرایش) معکوس[1] می‌نامند ودر حالت ایده‌ال جریان معکوس صفر است و دیود هدایت نمی‌کند. لیکن واقعیت این است کـه تـحریک حـرارتـی[2] باعث می‌شود که تعدادی از پیوندهای هم ظرفیتی در سـاختمان کـریستالی شکسـته شـده و تعدادی زوج الکترون - حفره بوجود آید. بنابراین در نیمه‌هادی نوع P تعداد کمی الکترون و در نیمه‌هادی نوع N تعداد کمی حفره بوجود می‌آیند. این حاملهای اقلیت (الکترون در ماده نوع P و حفره در ماده نوع N) تحت تأثیر ولتاژ معکوس از عرض پیوند عـبور کـرده و یک جـریان معکوس از دیود و مدارآن عبور می‌کند. به این جریان که مقدار آن خیلی کم است (در حدود چند میلی آمپر) جریان نشتی معکوس[3] گفته می‌شود. این جریان در مشخصه شکل ۲-۲ نشان داده شده است. مقدار جریان نشتی معکوس با افزایش درجـه حـرارت، زیـاد مـی‌شود زیـرا تـعداد حاملهای اقلیت با افزایش درجه حرارت، افزایش می‌یابد.

با افزایش ولتاژ معکوس، جریان معکوس ثابت می‌ماند تااینکه ولتاژ معکوس به حد معینی برسد. وقتی ولتاژ به آن حـد مـی‌رسد شکست (فـروپاشی) مـعکوس[4] رخ مـی‌دهد و جریان بطور ناگهانی افزایش می‌یابد، که اگر چنانچه با گرمای فوق العاده‌ای همراه نباشد موجب خرابی آن نمی‌شود. علت این شکست و عبور جریان زیاد ناشی از دو عامل فیزیکی است یکی اثر شکست زنر[5] می‌باشد بدین مـعنی کـه پـیوندهای هـم ظـرفیتی در اثـر مـیدان الکـتریکی شدیدپاره می‌شوند و الکترون‌ها آزاد می‌گردند و دیگر شکست بهمنی[6] است یعنی اینـکه بـا افزایش ولتاژ معکوس حاملهای اقلیت شتاب گرفته و انرژی لازم را بدست آورده طـوریکه در برخورد با یون‌های کریستال، پیوند هم ظرفیتی را گسیخته و زوج‌های الکترون - حفره جدیدی را تولید می‌نمایند. این حاملها نیز از ولتاژ اعمال شده انرژی کافی کسب کرده و با یونهای دیگر برخورد نموده و زوج‌های الکترون - حفره دیگری را ایجاد می‌کنند. بنابراین هر حامل جدیدی به نوبه خود در اثر تصادم و گسیختن پیوند هم ظرفیتی حاملهای جدیدی رابوجود می‌آوردو اثر جمعی این فرایند به شکست بهمنی و عبور جریان معکوس زیاد منتهی می‌گردد.

هنگامیکه یک ولتاژ مستقیم - آند نسبت به کاتد مثبت است - به دیود اعمال می‌گردد

1- Reverse bias
2- Thermal agitation
3- Reverse leakage current
4- Reverse breakdown
5- Zener breakdown
6- Avalanche breakdown

http://levinic.com

ارتفاع پتانسیل سد کاهش می‌یابد اگر ولتاژ اعمال شده از سد پتانسیل تجاوز نماید حاملهای اکثریت از عرض پیوند بطرف دیگر عبور می‌کنند (پتانسیل مثبت در طرف P باعث می‌شود که حفره‌های مثبت نیمه‌هادی نوع P بطرف پیوند رانده شوند و همینطور پتانسیل منفی در طرف نیمه‌هادی N الکترون‌ها را به طرف پیوند می‌راند.) این حالت را بایاس (گرایش) مستقیم می‌گویند و دراین حالت دیود هدایت می‌کند و در شرایط ایده‌ال بصورت اتصال کوتاه عمل می‌کند. لیکن واقعیت این است که دیود در هدایت اتصال کوتاه نبوده و با ازدیاد ولتاژ مستقیم، جریان بطور نمایی افزایش می‌یابد. بطور کلی رابطه ولت - آمپر دیود تقریباً بصورت زیر می‌باشد:

$$I = I_s \left[e^{qV/\eta KT} - ۱\right] \qquad (۱-۲)$$

که درآن، I جریان دیود بر حسب آمپر است.

I_s جریان نشتی معکوس برحسب آمپراست.

q بار الکترون برابر $۱/۶\times۱۰^{-۱۹}$ C است.

K ثابت بولتزمن[1] برابر $۱/۸۳\times۱۰^{-۲۳}$ J/K°

T درجه حرارت برحسب K°

η عدد تجربی است که بین ۱ و ۲ قراردارد.

V ولتاژ اعمال شده به دیود بر حسب ولت است.

که مشخصه مستقیم (هدایت) شکل ۲-۲ را ایجاد می‌کند. با فرض $V_T = KT/q$ می‌توان معادله (۲-۱) را به صورت زیر نوشت:

$$I = I_s \left(e^{V/\eta V_T} - ۱\right) \qquad (۲-۲)$$

در درجه حرارت اطاق ($T = ۳۰۰^\circ K$)، $V_T = ۲۵$ mV است. این معادله نشان می‌دهد که اگر V منفی باشد و مقدارش خیلی بزرگتر از ηV_T باشد جریان $I \approx -I_s$ خواهد بود.این همان جریان نشتی معکوس است که مقدارش ثابت و مستقل از بایاس معکوس اعمال شده می‌باشد.

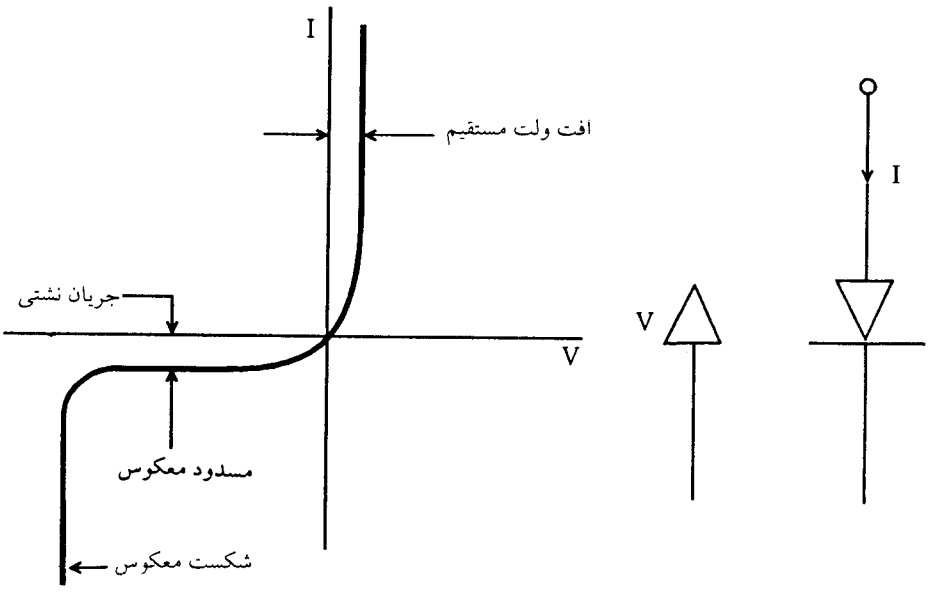
اگر V مثبت‌باشدومقدارآن‌خیلی‌بزرگتراز ηV_T باشد جریان دربایاس مستقیم برابراست با

$$I = I_s e^{V/\eta V_T} \qquad (۳-۲)$$

1- Boltzman

http://levinic.com

مشخصه کامل دیود در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲ مشخصه دیود

۲ - ۳ تریستور[1]

تریستور اصطلاحی است که از کلمات ترانزیستور[2] و تیراترون[3] مشتق شده است و نامی است که به وسایل نیمه‌هادی‌ای[4] که دارای مشخصه‌های مشابه لامپ‌های گازدار تیراترون هستند، اطلاق می‌شود. قبل از توسعه تریستورها، تیراترون وسیله متداولی برای بسیاری از کاربردها در کنترل صنعتی بود. تریستور یک نیمه‌هادی چهار لایه‌ای PNPN است که دارای سه ترمینال (پایانه) و سه پیوند[5] است. آند و کاتد ترمینالهای قدرت تریستور بوده و حال آنکه ترمینال سوم آن به گیت (الکترود فرمان[6]) موسوم است که مربوط به کنترل این وسیله نیمه‌هادی می‌شود(شکل ۲-۳).

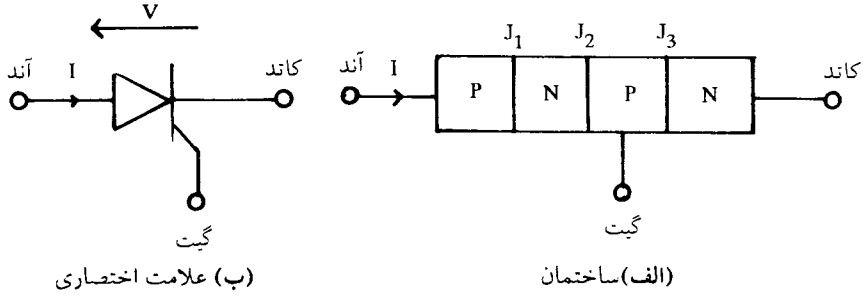
مشخصه استاتیکی تریستور در شرایطی که به گیت آن جریانی اعمال نمی‌گردد، در شکل

1- Thyristor
2- Transistor
3- Tyratron
4- Semiconductor devices
5- Junction
6- Gate

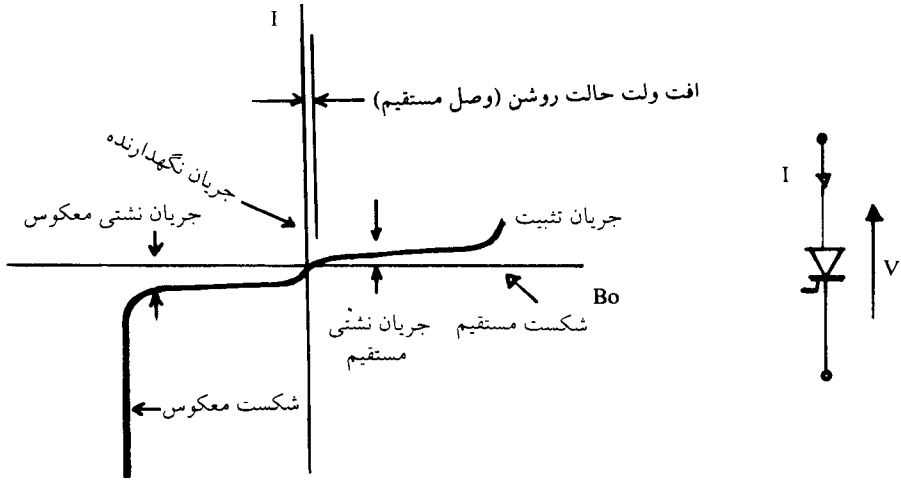
http://levinic.com

۲-۴ نشان داده شده است. در این شرایط وقتی که ولتاژی به دو سرآن اعمال نمی‌گردد، حاملهای بار بطور یکنواخت در لایه‌های مختلف P و N توزیع شده‌اند و بواسطه وجود سد پتانسیل یاناحیه تخلیه در محل پیوندها، حاملهای بار نمی‌توانند از لایه‌ای به لایه دیگر عبور نمایند. (شکل ۲-۵)

چنانچه در این شرایط آند تریستور به قطب منفی و کاتد آن به قطب مثبت باطری وصل شود، یعنی اینکه تریستور در بایاس (گرایش) معکوس قرار گیرد، یک جابجایی حاملهای بار مطابق شکل ۲-۶ پیش می‌آید. طوریکه حفره‌ها بطرف الکترود منفی کشیده می‌شوند و در اطراف آند جمع می‌شوند و بر عکس الکترون‌ها از آند دور می‌شوند و در طرف مقابل آند جمع می‌شوند و بدین‌ترتیب در اطراف سه پیوند PN تجمع حاملهای بار به ترتیب زیر می‌شود:

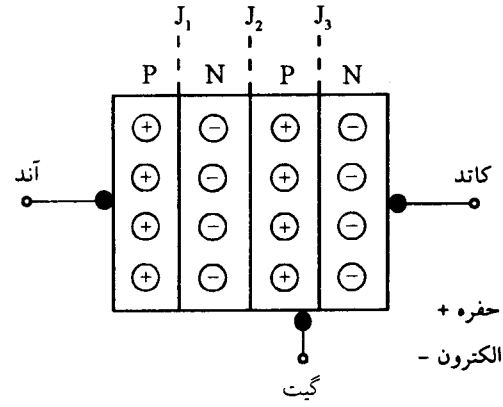


شکل ۲-۳ تریستور

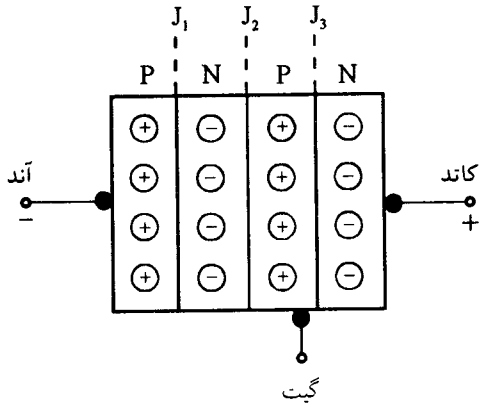


شکل ۲-۴ مشخصه تریستور در غیاب جریان گیت

http://levinic.com



شکل ۲-۵: توزیع‌بار بدون اعمال ولتاژ



شکل ۲-۶ توزیع بار با اعمال ولتاژ منفی

پیوند J_1 که خالی از حاملهای بار شده است، بایاس معکوس گردیده و مانع عبور جریان می‌شود. پیوند J_2 که از حاملهای بار پر شده است، بایاس مستقیم گردیده و می‌تواند باعث عبور جریان شود. پیوند J_3 همانند پیوند J_1 است و مانع عبور جریان می‌گردد.

بنابراین در بایاس معکوس، تا قبل از رسیدن به نقطه شکست، دو پیوند J_1 و J_3 سدکننده و مانع عبور جریان هستند و فقط جریان نشتی معکوس[1] کوچکی از تریستور عبور می‌کند. در این حالت گفته می‌شود که وسیله در حالت مسدود معکوس[2] قراردارد.

چنانچه آند تریستور را به قطب مثبت باطری و کاتد آنرا به قطب منفی باطری وصل کنیم (بایاس مستقیم) حاملهای بار مطابق شکل ۲-۷ جابجا می‌شوند. چنانچه ملاحظه می‌شود آند مثبت حفره‌ها را دفع و الکترونها را جذب می‌کند و باعث تجمع حاملها در محل پیوندها به صورت زیر می‌شود:

پیوند J_1 که از حاملهای بار پر شده است، بایاس مستقیم گردیده و هادی جریان است.

پیوند J_2 که از حاملهای بار خالی شده است، بایاس معکوس شده و مانع عبور جریان است.

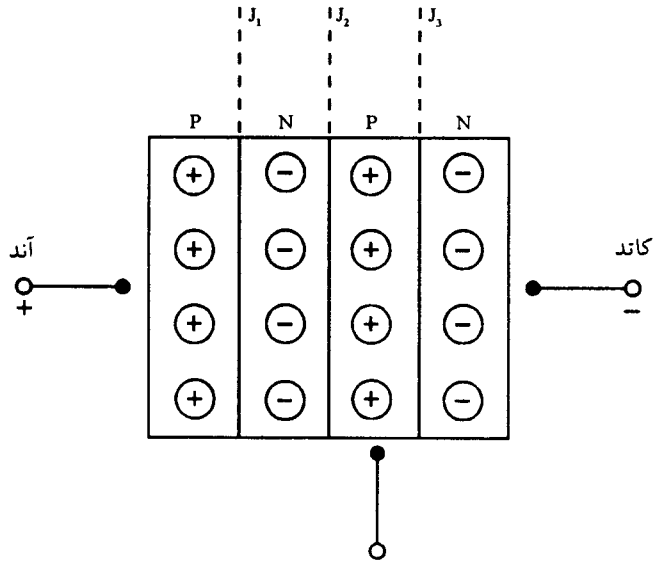
پیوند J_3 همانند پیوند J_1 از حاملهای بار پر شده است و عبور جریان را آزاد می‌کند.

بنابراین در بایاس مستقیم، پیوند J_2 سدکننده است و از تریستور فقط جریان نشتی مستقیم[3] کوچکی عبور می‌کند. در این حالت، وسیله در حالت مسدود مستقیم[4] قرار دارد.

1- Reverse leakage current 2- Reverse blocking state 3- Forward leakage current

4- Forward blocking state

http://levinic.com



شکل ۲-۷ توزیع بار با اعمال ولتاژ مثبت

همانطوریکه در مشخصه شکل ۲-۴ ملاحظه می‌شود به ازاء ولتاژ شکست (عبور)* مستقیم[1] مقدارجریان تا جریان تثبیت کننده (قفلی)[2] افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر ولتاژ، پیوند J_2 که بایاس معکوس و مانع عبور جریان است در اثر تغییرات یا گرادیان ولتاژ دو سرلایه‌های تخلیه، شکسته می‌شود و در حقیقت پدیده بهمنی رخ می‌دهد. از آنجائی‌که پیوندهای J_1 و J_3 مانع عبور جریان نمی‌باشند، حرکت آزاد حاملهای جریان در هر سه پیوند وجود داشته و موجب برقراری جریان زیاد از آند به کاتد می‌گردد. به عبارت دیگر هنگامیکه در بایاس مستقیم شکست رخ می‌دهد، لایه P مرکزی بوسیله الکترون‌های کاتد خنثی شده و وسیله بصورت یک دیود هدایت کننده که دارای دو پیوند است عمل می‌کند وافت ولتاژ مستقیم تقریباً دو برابر دیود را موجب می‌شود. در این صورت گفته می‌شود که وسیله در حالت روشن (وصل)[3] است.

---

* به این دلیل ولتاژ شکست و عبور گفته می‌شود که دراین ولتاژ شکست رخ می‌دهد و تریستور از مرحله خاموشی به هدایت عبور می‌کند.

1- Forward breakover voltage

2- Laiching current

3- On state

http://levinic.com

جریان در این حالت توسط امپدانس خارجی که وسیله در آن قراردارد، محدود می‌گردد. حال اگر ولتاژ آند - کاتد کاهش یابد، بدلیل اینکه در اثر حرکت حاملهای بار، دیگر ناحیه تخلیه و پیوندِ بایاس معکوس J_2 وجود ندارد وسیله در حالت روشن باقی می‌ماند. وقتی که جریان آند از مقدار جریان نگهدارنده[1] کمتر گردد، در اثر کم شدن حاملهای جریان، ناحیه تخلیه در اطراف پیوند J_2 گسترش یافته و وسیله به حالت مسدود می‌رود. بنابراین برای اینکه تریستور بتواند به حالت روشن (وصل) برسد و درآن باقی بماند، بایستی مطابق شکل ۲-۴ جریان آند به مقدار جریان تثبیت کننده برسد و از مقدار جریان نگهدارنده کمتر نگردد. این مقدار جریان برای نگاه داشتن میزان موردنیاز عبور حاملهای بار لازم است.در غیراین صورت به محض اینکه ولتاژ آند -کاتد کاهش یابد وسیله به حالت مسدود باز می‌گردد. بطور نمونه جریان تثبیت دو برابر جریان نگهدارنده است اما مقدار هر دو کم بوده و از یک درصد جریان نامی هم کمتراست.

هنگامی که تریستور بایاس معکوس می‌شود رفتار وسیله مانند دو دیود است که بطور سری بهم متصل‌اند و ولتاژ معکوس به دو سر آن اعمال می‌شود. با افزایش ولتاژ معکوس، در مقدار معینی از ولتاژ پدیده شکست رخ می‌دهد که به این ولتاژ، ولتاژ شکست معکوس[2] گفته می‌شود. (به مشخصه تریستور دربایاس معکوس در شکل ۲-۴ مراجعه شود). ولتاژ شکست معکوس و ولتاژ شکست (عبور) مستقیم یک‌تریستور ازنظرمقدارتقریبا"باهم‌برابرند. ازاین بحث می‌توان نتیجه گرفت که تریستور یک عنصر دو حالتی است، یکی حالت روشن (وصل) و دیگری حالت خاموش (قطع). عبور از حالت قطع به حالت وصل که با افزایش ولتاژ بایاس مستقیم تا رسیدن به ولتاژ شکست (عبور) مستقیم V_{BO} تحقق می‌یابد، روشن کردن نامیده می‌شود. عکس این حالت که خاموش کردن نام دارد باکاهش جریان آند به میزان کمتر از جریان نگهدارنده I_h عملی می‌شود.

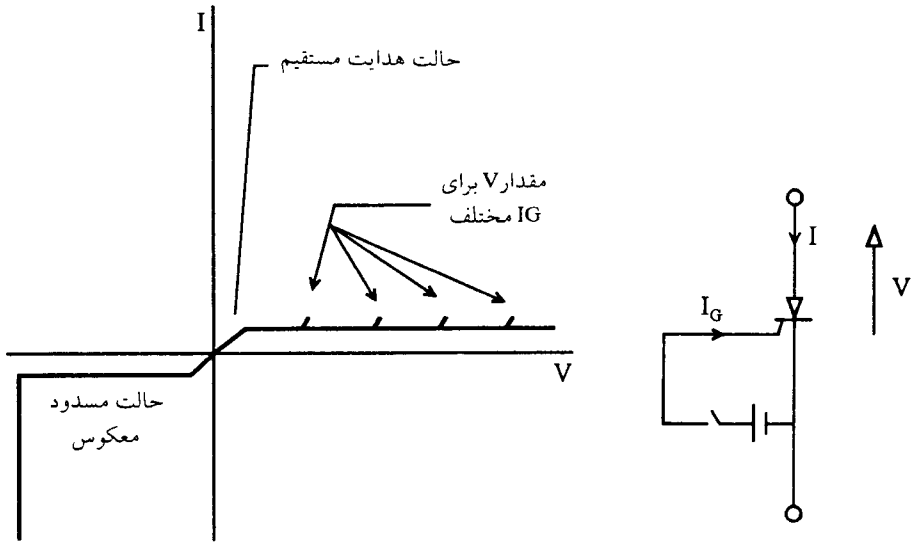
البته باید توجه داشت که در این بحث فرض براین بوده است که جریان گیت صفر باشد و تحت چنین شرایطی این نحوه روشن و خاموش کردن تریستور مورد بررسی قرار گرفته است. لیکن باید دانست که در روشن کردن تریستورهااین روش معمول نبوده، بلکه با بکار گرفتن کنترل گیت می‌توان آن را به سهولت و در ولتاژهای کمتر از V_{BO} روشن کرد. طریقه روشن کردن باگیت که به کنترل گیت یا تحریک گیت معروف است در زیر تشریح خواهد شد.

تریستوری که در جهت مستقیم بایاس شده است را درنظر می‌گیریم دراین حالت همانطوّریکه قبلا" ملاحظه کردیم پیوندهای J_1 و J_3 مزاحم عبور جریان نیستند و فقط پیوند J_2 است که مانع برقراری جریان شده است. حال اگر کاری کنیم که این پیوند نیز با حاملهای جریان

1- Holding current 2- Reverse breakdown voltage

http://levinic.com

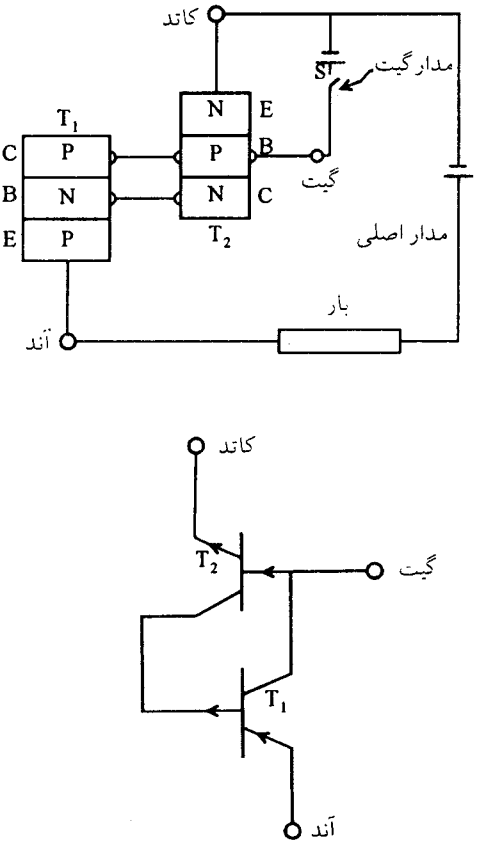
پر شود، مانع عبور جریان برداشته شده و قطع شدگی بین J_1 و J_3 از بین می‌رود و از تریستور جریان عبور می‌کند. در ساده‌ترین شکل می‌توان یک باطری را بین گیت و کاتد قرارداد اگر قطب مثبت باطری به گیت و قطب منفی به کاتد وصل شود قطع شدگی پیوند J_2 از بین می‌رود و تریستور روشن می‌شود (شکل ۲-۸). علت این امر این است که در اثر اعمال ولتاژ مثبت بین گیت و کاتد، جریان نشتی معکوس عبوری از پیوند J_2 افزایش می‌یابد و دراثر این افزایش سرانجام پیوند می‌شکند و تریستور در ولتاژ کمتر از V_{BO} شروع به هدایت می‌کند. دلیل افزایش جریان نشتی معکوس این است که در اثر اعمال ولتاژ به گیت - کاتد، حفره‌ها به درون لایه P داخلی تزریق می‌شوندو به سمت کاتد می‌روند و الکترون‌ها از کاتد به سمت گیت می‌روند. به دلیل گرادیان ولتاژ اعمال شده، قسمتی از این الکترون‌ها به ناحیه J_2 رسیده و تمرکز حاملهای اقلیت در لایه P نزدیک پیوند J_2 را بیشتر می‌کنند.در نتیجه موجب زیادشدن جریان نشتی معکوس می‌گردند. همانطوریکه در شکل ۲-۸ ملاحظه می‌شود با افزایش جریان گیت، شکست در ولتاژ کمتری صورت می‌گیرد.



شکل ۲-۸ مشخصه تریستور با حضور جریان گیت

جهت پی‌بردن به نقش جریان گیت در روشن کردن تریستور، همچنین می‌توان از مدل دو ترانزیستوری یک تریستور استفاده کرد. یعنی اینکه برای بررسی‌این موضوع می‌توان تریستور را مطابق شکل ۲-۹ به دو ترانزیستور PNP (T_1) و ترانزیستور NPN (T_2) تجزیه کرد. چنانچه

http://levinic.com

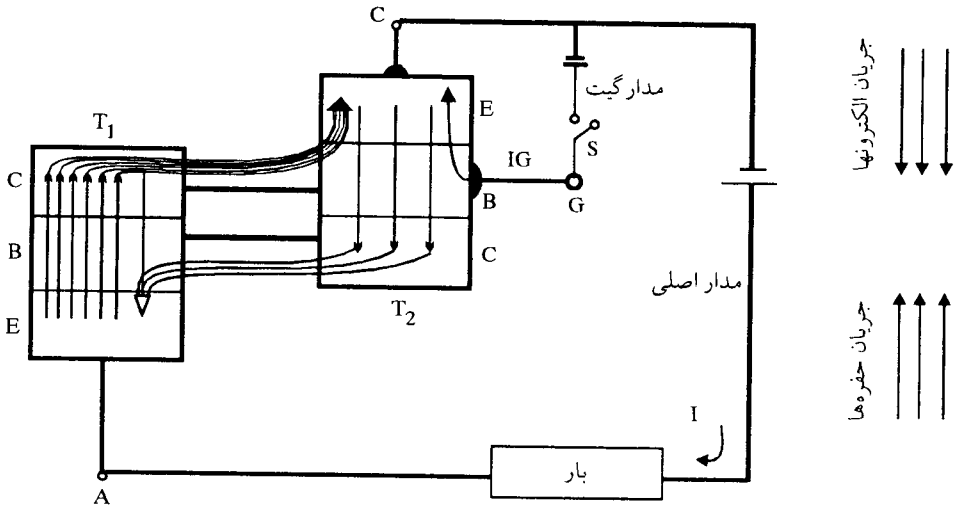


شکل ۲-۹ مدل دو ترانزیستوری تریستور

ملاحظه می‌شود هر دو ترانزیستور توسط بیس B و کلکتور C بهم مرتبط هستند. همانطوریکه می‌دانیم مدار اصلی در محل پیوند J_2 قطع است و اگر کلید S راکه در مدار گیت قراردارد ببندیم با توجه به مدارمعادل ترانزیستوری شکل ۲-۱۰ خواهیم دید:

در اثر پتانسیل مثبت بیس ترانزیستور T_2 و پتانسیل منفی امیتر آن حفره‌های مثبت از بیس به طرف امیتر می‌روند و الکترونهای آزاد امیتر از پیوند EB گذشته وارد بیس می‌شوند. در نتیجه پیوند EB هادی شده و جریان گیت I_G از مدار گیت به عنوان جریان تحریک کننده یا راه‌انداز از تریستور عبور می‌کند. الکترونهای آزاد که از امیتر وارد بیس شده‌اند از مرز بین بیس و کلکتور نیز گذشته وارد کلکتور ترانزیستور T_2 می‌شوند. چون کلکتور T_2 بابیس T_1 مرتبط است این الکترون‌ها از بیس T_1 وارد امیتر ترانزیستور T_1 که به شدت مثبت است می‌گردند و در نتیجه مرز بین امیتر و بیس ترانزیستور T_1 هادی شده و حفره‌های موجود از مرز عبور کرده و از بیس

http://levinic.com



شکل ۲-۱۰ مدار معادل دو ترانزیستوری تریستور

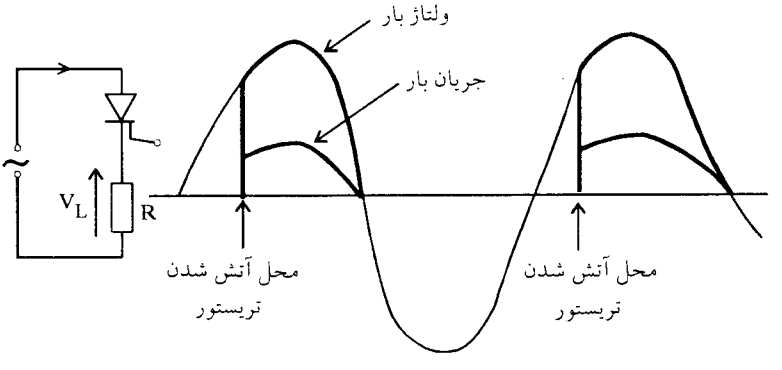
T_1 گذشته وارد کلکتور T_1 می‌شوند واز آنجا به علت ارتباط کلکتور با بیس T_2 وارد بیس ترانزیستور T_2 شده و به علت منفی بودن شدید امیتر T_2 وارد امیتر T_2 می‌شود.

بدین‌ترتیب حاملهای بار مدار بسته‌ای را می‌پیمایند و هر وقت پیوند BC که قبلاً عامل قطع مدار بوده است، توسط حاملهای بار پر شود پیوند J_2 هادی شده و قطع‌شدگی از بین می‌رود و باصطلاح تریستور روشن می‌شود و مانع عبور جریان برداشته می‌شود.

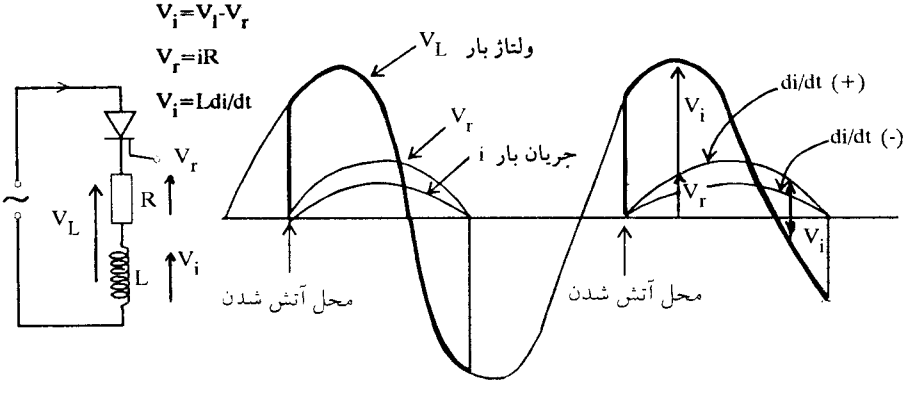
بنابراین می‌توان گفت که جریان گیت در T_2 باعث جریان کلکتور می‌شود که در ضمن به‌عنوان جریان بیس در T_1 موثر است و باعث می‌شود که جریان الکترونی کلکتور T_1 راه بیفتد. همین جریان الکترونی کلکتور T_1 به عنوان جریان بیس از T_1 به T_2 برمی‌گردد. اگر این جریان‌های کلکتور T_1 و T_2 جریان حفره‌ای و الکترونی که از ارتباط بین دو ترانزیستور می‌گذرند شدت معین و قابل ملاحظه‌ای را پیدا کنند و قطع‌شدگی داخلی بکلی از بین برود، در این صورت برای ادامه جریان دیگر نیازی به جریان گیت نیست و عمل عبور جریان خودبخود انجام می‌شود و تریستور روشن می‌ماند. بنابراین می‌توان گفت که فقط یک جریان ضربه‌ای برای تحریک کردن تریستور و روشن کردن آن کافی است. در صورتیکه در ترانزیستور جریان کلکتور (در نتیجه مداراصلی) را می‌توان با تغییر جریان بیس، تغییرداد و یابا صفر کردن جریان بیس قطع کرد و حال آنکه برای قطع شدن تریستور بایستی جریان تریستور به صفر تنزل یابد. بنابراین در مدار جریان متناوب عمل قطع شدن تریستور در نقطه صفر جریان بطور خودکار انجام می‌گیرد. از این جهت کاربرد آن در فرمان و تنظیم جریان متناوب مناسب است.

http://levinic.com

شکل ۲-۱۱ الف و ۲-۱۱ ب، تریستور ایده‌الی را نشان می‌دهد که به ترتیب یک بار مقاومتی و یک بارالقایی (اندوکتیو) را تغذیه می‌کند. در هر دو حالت تریستور با تأخیر یک چهارم سیکل پس از نقطه صفر ولتاژ، روشن می‌شود. در حالت بار مقاومتی جریان بار دقیقاً از ولتاژ بار تبعیت می‌کند. در حالت بارالقایی، ولتاژ بار متشکل از دو مولفه است یکی ولتاژ دوسر اندوکتانس (V_i) و دیگری ولتاژ دو سر مقاومت (V_r) و جریان تریستور دارای مقدار اولیه صفر است. آنگاه جریان افزایش می‌یابد و در نقطه ماگزیمم di/dt صفر شده بنابراین ولتاژ دو سر اندوکتانس (V_i) در این نقطه صفر است (زیرا $V_i = Ldi/dt$ است) و در نتیجه ولتاژ بار (V_L) برابر ولتاژ دو سر مقاومت (V_r) خواهد بود. پس از نقطه ماکزیمم، شیب جریان (di/dt) منفی خواهد شد، پلاریته (V_i) تغییر خواهد کرد و بنابراین افت ولتاژ مستقیم در دوسر تریستور حفظ می‌شود تا اینکه انرژی ذخیره شده در اندوکتانس تلف گردد.



(الف) باراهمی



(ب) بارالقایی

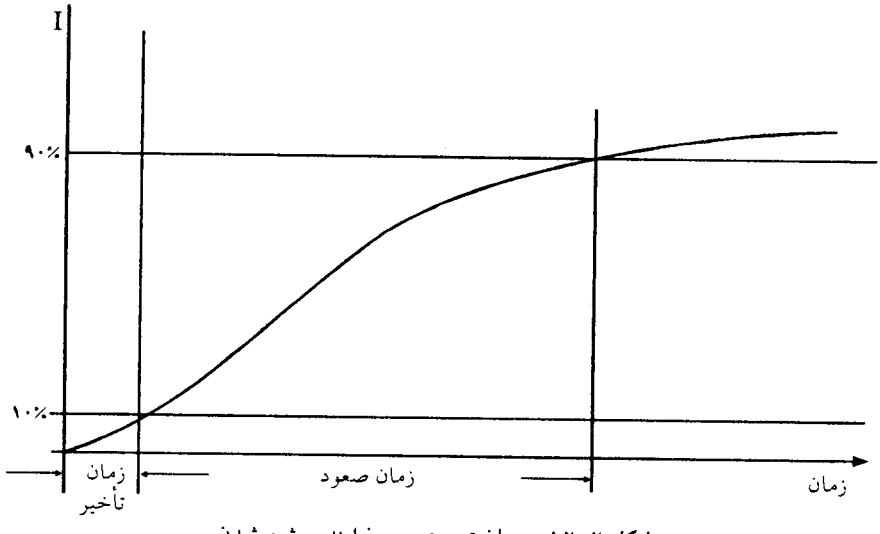
شکل ۲-۱۱ عملکرد تریستور در بارهای مختلف

http://levinic.com

۲-۳-۱ فرایند روشن کردن (وصل)

با اعمال جریان گیت و پس از شروع شکست مستقیم تریستور، در صورتی که جریان تریستور به مقدار قفلی (تثبیت کننده) برسد، فرایند هدایت مستقل از شرایط گیت استقرار خواهد یافت. بنابراین مدت زمان لازم جهت رسیدن جریان تریستور به مقدار قفلی‌اش، بیانگر حداقل زمانی است که بایستی در خلال آن جریان گیت به تریستور اعمال گردد تا روشن شدن (وصل) تحقق یابد.

مدت زمان سپری شده از لحظه اعمال جریان گیت تا لحظه‌ای که جریان تریستور به ۹۰ درصد مقدارنهایی خود می‌رسد به زمان روشن شدن (وصل)[1] معروف است. این فاصله زمانی از دو فاصله زمانی موسوم به زمان تأخیر[2] و زمان صعود (خیز)[3] تشکیل یافته است. زمان تأخیر، مدت زمانی است که طی آن جریان تریستور به ۱۰ درصد مقدار نهایی خود می‌رسد و زمان صعود، مدت زمانی است که طی آن جریان از ۱۰درصد به ۹۰درصد مقدار نهایی خود می‌رسد. رابطه بین این مقادیر در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است. میزان (نرخ)[4] افزایش جریان تریستور با اندوکتانس بار تغییر می‌کند و افزایش اندوکتانس موجب افزایش زمان روشن شدن (وصل) می‌گردد.



شکل ۲-۱۲ جریان تریستور در فرایند روشن شدن

1- Turn-on time 2-Delay time 3- Rise time

4- Rate

http://levinic.com

مثال ۲-۱

در شکل ۲-۱۳ جریان قفلی تریستور بکار رفته ۴۰ mA است. اگر چنانچه یک پالس آتش ۵۰μs در لحظه ماکزیمم ولتاژ منبع تغذیه، به تریستور اعمال گردد، نشان دهید که تریستور روشن نخواهد شد. اگر چنانچه مطابق شکل مقاومت R_{Sh} در مدار قرار گیرد به ازاء چه مقدار R_{Sh} تریستور روشن خواهد شد.

حل - در لحظه اعمال پالس ولتاژ منبع تغذیه ماکزیمم می‌باشد یعنی برابر ۱۰۰ Cos ωt است، پس از اعمال پالس داریم،

$$۱۰۰ \cos \omega t = iR + L di/dt$$

با استفاده از تبدیل لاپلاس داریم:

$$i = ۱۰۰[\cos(\omega t - \phi) - \cos\phi e^{\frac{-R}{L}t}] / (R^۲ + \omega^۲ L^۲)^{\frac{۱}{۲}}$$

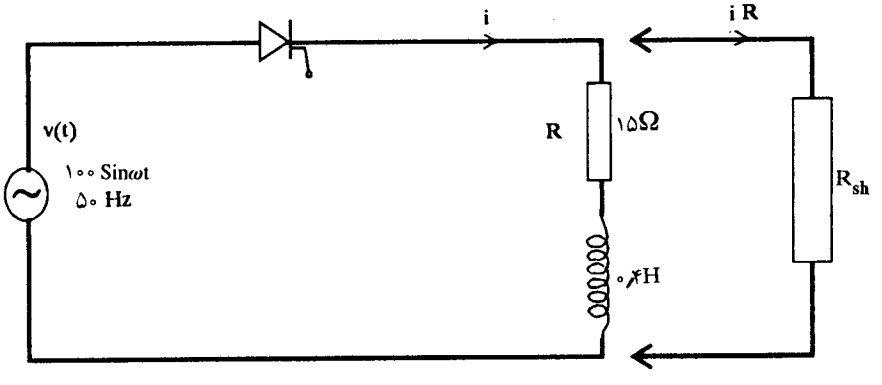
با قراردادن مقادیر $(R^۲ + \omega^۲ L^۲)^{\frac{۱}{۲}} = ۱۲۶/۶$ و $\phi = \tan^{-۱} \omega L/R = ۸۳/۱۹° = ۱/۴۵۲$ rad در معادله فوق پس از ۵۰ μs جریان برابر i = ۰/۰۱۲۴A و یا ۱۲/۴ mA خواهد شد که از ۴۰mA کوچکتراست و از اینرو تریستور روشن نخواهد شد.

با اتصال دادن مقاومت R_{Sh} به مدار، جریان i_R ازآن می‌گذرد بنابراین جریان عبوری از تریستور برابراست با :

$$i_T = i + i_R$$

برای روشن شدن بایستی $i + i_R = ۴۰$ mA

$$i_R = ۴۰ - ۱۲/۴ = ۲۷/۶ \text{ mA}$$



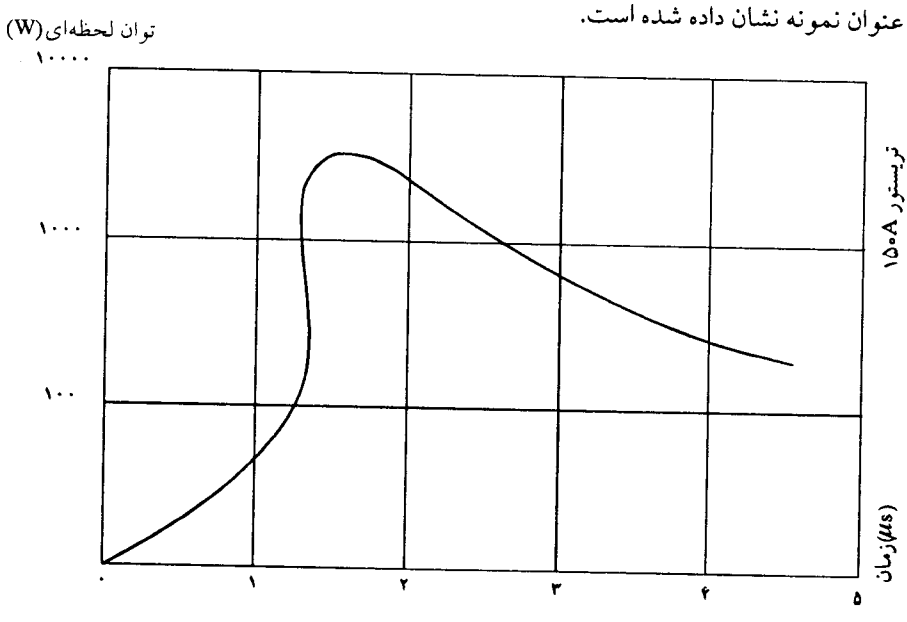
شکل ۲-۱۳ مربوط به مثال ۲-۱

http://levinic.com

حداکثر مقدار R_{Sh} برابر خواهد بود با

$$R_{sh} = ۱۰۰\text{Cos}(۱۰۰\pi \times ۵۰ \times ۱۰^{-۶}) / ۰/۰۲۷۶ = ۳۶۲۳\ \Omega$$

از آنجائیکه ضرورت دارد که از وقوع میزان افزایش زیاد جریان در سطوح ولتاژ زیاد (که منجر به حاصلضرب جریان و ولتاژ یا توان زیاد و صدمه دیدن تریستور در مقابل حرارت زیاد ناشی از آن می‌گردد) اجتناب گردد، زمان روشن شدن (وصل)[1] تریستور همچنین محدود می‌گردد. در شکل ۲-۱۴ تغییرات توان لحظه‌ای یک تریستور ۱۵۰ آمپری نسبت به زمان به عنوان نمونه نشان داده شده است.

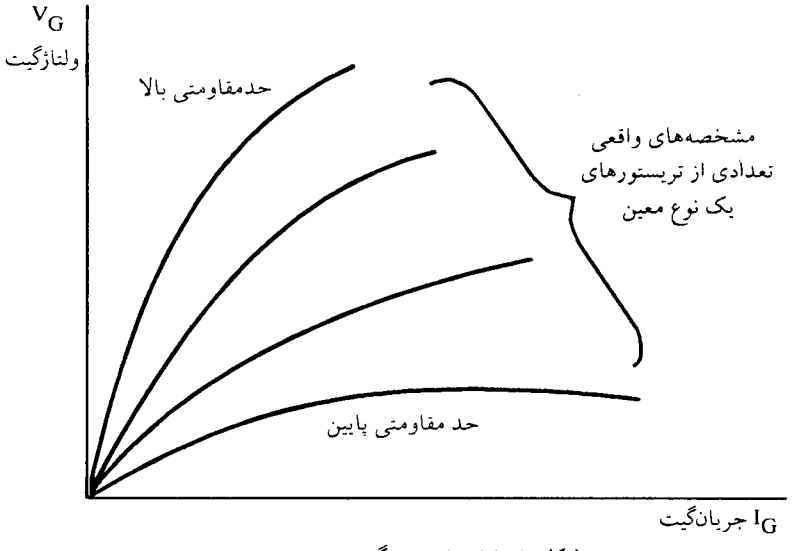


شکل ۲-۱۴ توان لحظه‌ای تریستور در خلال روشن شدن

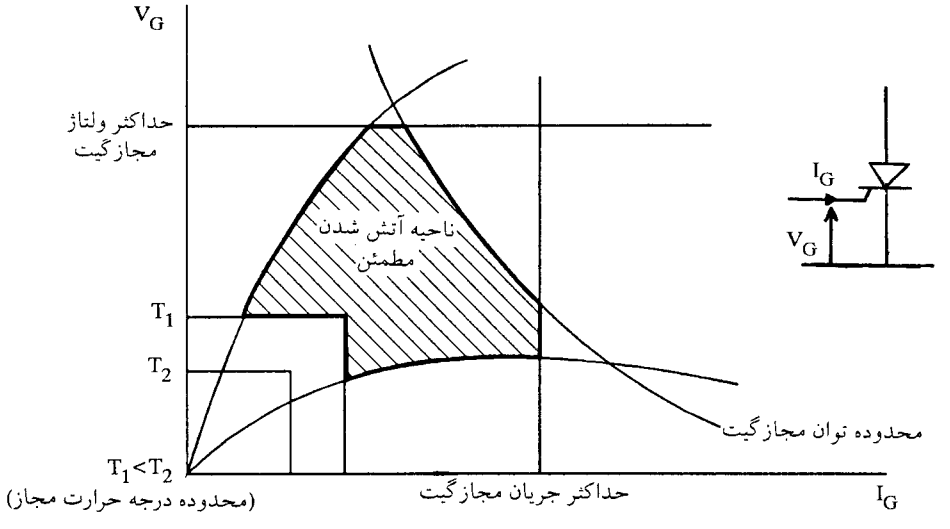
سیگنال گیتی که برای روشن کردن تریستور لازم است تحت تأثیر مشخصه ولتاژ جریان گیت قراردارد. مشخصه گیت - کاتد تریستور مشابه مشخصه یک پیوند P-N است. تریستورهای تولید شده در یک نوع معین هر یک دارای مشخصه‌ای مطابق شکل ۲-۱۵ هستند که در محلی بین حد مقاومتی پائین و حد مقاومتی بالا قرار می‌گیرند. علاوه بر موارد فوق ولتاژ گیت، جریان گیت، توان گیت و درجه حرارت محدودیتهایی را برسیگنال گیت تحمیل می‌نمایند. ولتاژ و جریان گیت هر دو در معرض حداکثر مقدار قرار دارند. از حاصلضرب ولتاژ و جریان گیت، سطح تلفات توانی بدست می‌آید که همچنین در معرض حداکثر مقداری قرار دارد. حداقل ولتاژ و جریان لازم برای روشن کردن تریستور تابعی از درجه حرارت پیوند است. در

http://levinic.com

شکل ۲-۱۶ نشان داده شده است که چگونه اعمال این محدودیت‌ها بر مشخصه گیت - کاتد، ناحیه‌ای را نتیجه می‌دهد که بایستی سیگنال آتش گیت در این ناحیه قرار گیرد. این ناحیه در شکل به صورت ناحیه آتش شدن مطمئن، مشخص گردیده است.



شکل ۲-۱۵ مشخصه گیت تریستور



شکل ۲-۱۶ ناحیه آتش شدن مطمئن تریستور با توجه به محدودیتها

http://levinic.com

با مراجعه به شکل ۲-۱۷ می‌توان نقطه کار واقعی را بدست آورد. در شکل ۲-۱۷ الف مرحله نهایی مدار آتش گیت نشان داده شده است که شامل یک ترانسفورماتور جداکننده (ایزوله)، یک مقاومت R_1 برای محدود کردن جریان گیت و یک مقاومت R_2 برای محدود کردن ولتاژ گیت در وضعیت خاموشی تریستور است.

معادل تونن مدار آتش در شکل ۲-۱۷ ب نشان داده شده است که در آن ولتاژ V_s با مقاومت R_G بطور سری قراردارد. رابطه بین V_s و I_G در این مدار توسط خط بارگیت (با شیب $-R_G$) تعریف می‌شود که از تلاقی آن با مشخصه مقاومتی گیت، نقطه کارگیت بدست می‌آید.(شکل ۲-۱۷پ). یعنی اینکه وقتی سیگنال آتش صادر می‌شود جریان گیت بر روی مشخصه گیت نمو می‌کند تا اینکه در حالت ماندگار نقطه P واقع بر روی خط بارفرابرسد. البته تریستور قبل از رسیدن به نقطه P در حوالی نقطه A روشن خواهد شد. پارامترهای شبکه آتش را باید طوری انتخاب کرد که خط بار بالای نقطه A، اما در محدوده حداکثر توان قرار گیرد. بطور نمونه مقدار V_s برابر۵ تا ۱۰ ولت و حداکثر جریان ۰/۵ تا ۱ آمپر خواهد بود.

برای اینکه بتوان تریستور را در کوتاهترین زمان روشن کرد، لازم است جریان گیتی با صعود (خیز) سریع در نیل به حداکثر مقدار مجاز را دراختیار داشته باشیم. جریان گیت با چنین زمان صعودی را می‌توان به بهترین وجه به کمک تکنیک‌های پالس بدست آورد، که درآن مدار آتش، پالس با زمان صعود سریع و طول کافی[1] تولید می‌نماید و به جریان آند فرصت کافی می‌دهد تا به مقدار قفلی‌اش (تثبیت کننده‌اش) برسد. جریان پالسی نسبت به جریان پیوسته برتری دارد، زیرا منجر به تلفات کمتری در گیت تریستور گردیده و همچنین می‌توان لحظه آتش کردن تریستور را دقیقاً تنظیم کرد. جهت آتش کردن مطمئن تریستور، معمولاً بجای یک پالس تکی[2] از مدار آتشی که رشته پالس[3] تولید می‌نماید، استفاده می‌گردد.

۲-۳-۲ فرایند خاموش کردن (قطع)

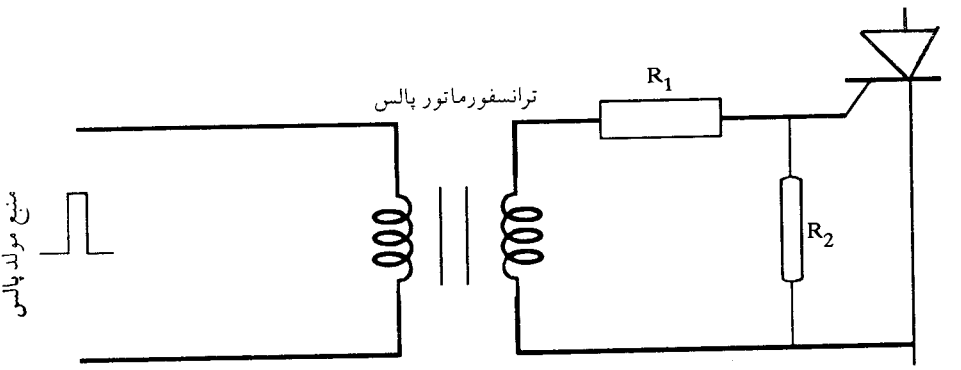
وقتی که تریستور بوسیله جریان گیت روشن گردید، گیت نقش کنترلی خود را از دست می‌دهد و خاموش کردن تریستور تنها با کاهش جریان آند به مقدار کمتر از جریان نگهدارنده امکان پذیراست. در مدارهای ac که جریان دارای مقدار صفر طبیعی است، تریستور بطور

1- Pulse length

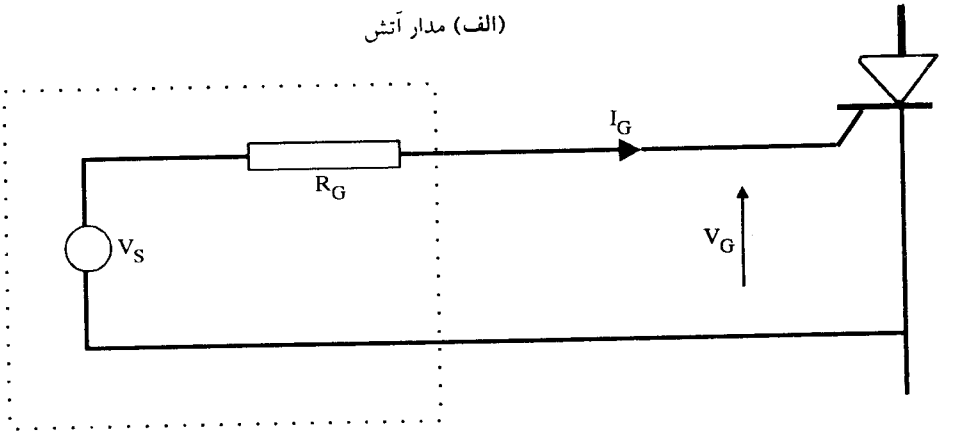
2- Single pulse

3- Train of pulses

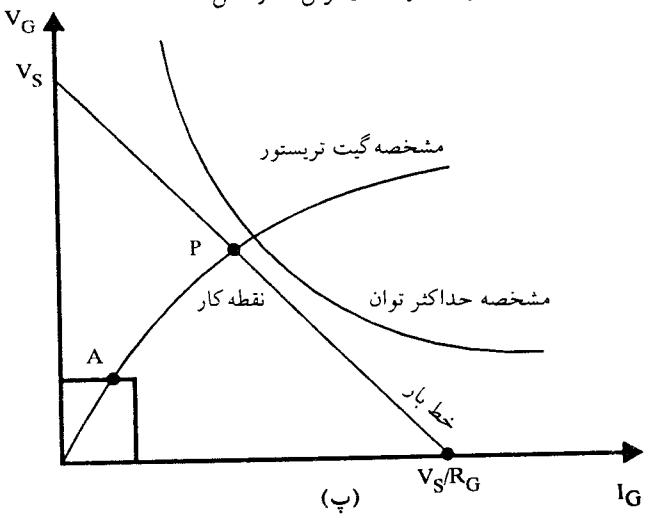
http://levinic.com



(الف) مدار آتش



(ب) مدار معادل تونن مدار آتش



(پ)

شکل ۲-۱۷ : عملکرد گیت و نقطه کار

http://levinic.com

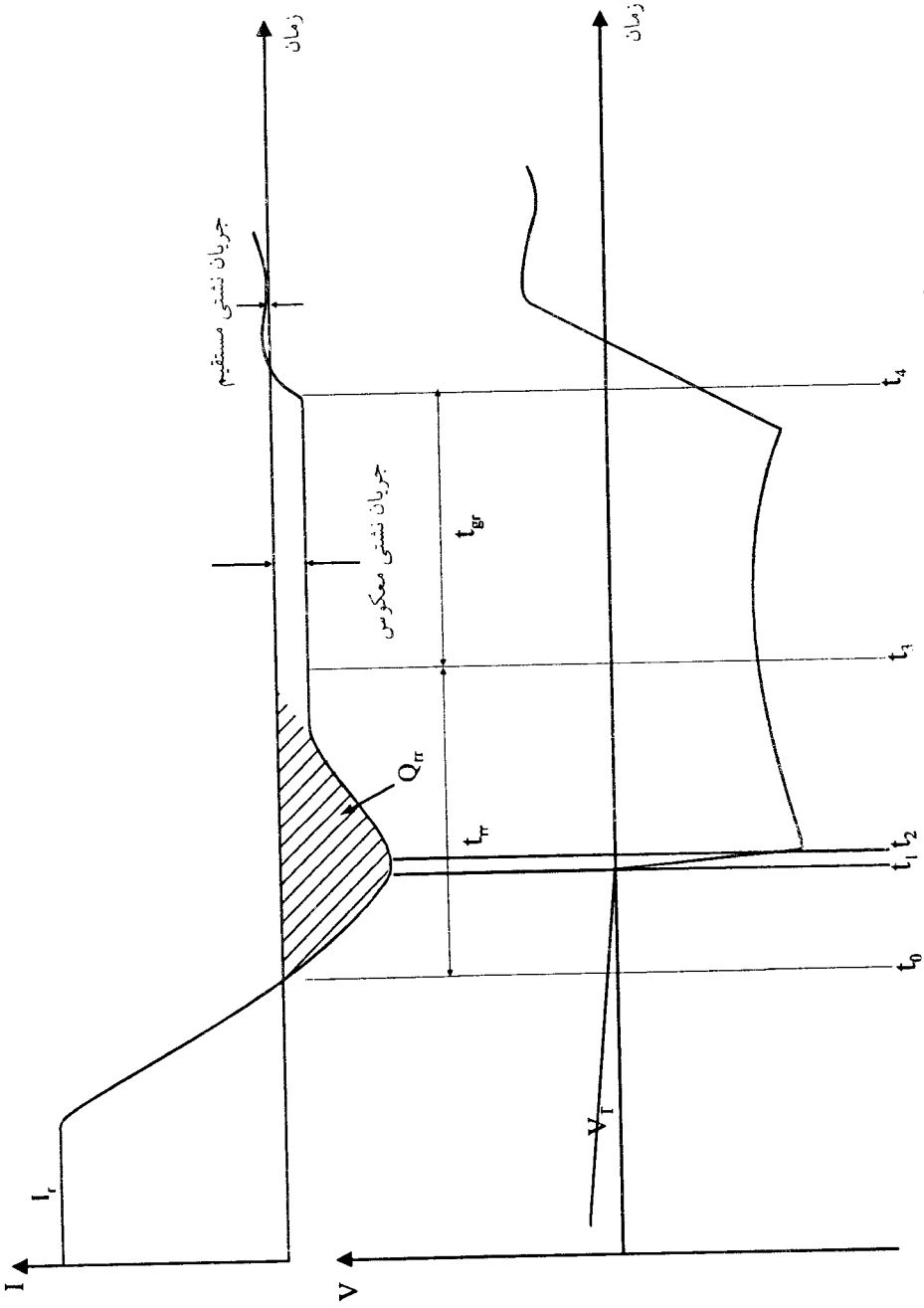
خودکار خاموش می‌شود (کموتاسیون طبیعی)[1]. در مدارهای dc که مقدار صفر طبیعی برای جریان وجود ندارد، می‌توان جریان مستقیم را از طریق شنت کردن تریستور توسط یک وسیله دیگر، کاهش داد یا اینکه با اعمال ولتاژ معکوس به دوسر آند و کاتد مقدار جریان گذرنده از تریستور را بطور اجباری به صفر رساند(کموتاسیون اجباری).[2] روشهای متعددی جهت قطع اجباری وجود دارد. در کلیه این روشها بایستی جریان آند تنزل یابد و در مقدار کمتر از جریان نگهدارنده، نگاه داشته شود تا اینکه تمامی حاملهای اضافی موجود در چهار لایه جاروب شده یا ترکیب مجدد یابند و در نتیجه یک لایه تخلیه در اطراف پیوند J_2 برقرار گردد. در مدارهای ac بواسطه ماهیت ولتاژ متناوبی که بین آند و کاتد برقرار می‌شود، بلافاصله پس از عبور جریان مستقیم تریستور از مقدار صفر، ولتاژ معکوسی در دوسرآن قرار می‌گیرد. این ولتاژ معکوس حاملهای اضافی را از دولایه خارجی (یعنی الکترونها را از لایه پائینی N و حفره‌ها را از لایه بالایی P) می‌زداید و در نتیجه عمل قطع را امکان‌پذیر می‌کند، در طی این فرایند یک جریان بازیابی (بازیافت) معکوس[3] برقرار می‌گردد. این جریان منفی، می‌تواند از مقدار معمول جریان نشتی معکوس وسیله بسیار بزرگتر باشد. حاملهای اضافی موجود در دو ناحیه داخلی فقط در اثر ترکیب مجدد می‌توانند از بین بروند. بنابراین زمان قطع[4] مورد نیاز (T_q) شامل دو فاصله زمانی t_{rr} و t_{gr} می‌باشد. t_{rr} مدت زمانی است که پس از اعمال ولتاژ معکوس، جریان بازیابی معکوس ادامه دارد و t_{gr} مدت زمان لازم برای ترکیب مجدد حاملهای اضافی در دو لایه داخلی وسیله است. در پایان زمان کل t_q، یک لایه تخلیه در دو طرف پیوند J_2 تشکیل می‌شود و وسیله حالت مسدودکنندگی خود را باز می‌یابد و در اثر اعمال مجدد ولتاژ مستقیم هدایت صورت نمی‌گیرد.

رفتار دینامیکی تریستور در خلال خاموش شدن (قطع) در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده است. ابتدا جریان مستقیم کاهش می‌یابد و در لحظه t_0 به صفر می‌رسدو آنگاه معکوس می‌گردد. در فاصله زمانی t_0 و t_1 بواسطه وجود حاملهای بار، جریان معکوس ادامه می‌یابد و افت ولت دو سر تریستور کوچک است. بواسطه ایجاد ناحیه تخلیه در اطراف پیوندها و از بین رفتن حاملهای بار در فاصله زمانی $t_2 - t_1$، جریان معکوس قادر نخواهد بود ادامه یابد و از لحظه t_2 به بعد شروع به کاهش می‌کند. در این لحظه ولتاژ معکوس کامل در دوسرتریستور ظاهر خواهد شد و از آنجائیکه مدار قدری اندوکتیو است ولتاژ دارای پرش کوچکی است. بنابراین جریان معکوس به مقدار جریان نشتی معکوس تنزل می‌یابد. بار ذخیره بازیابی شده در خلال این پریود، در شکل ۲-۱۸ بصورت ناحیه هاشور زده نشان داده شده است و به بار بازیابی

1- Natural Commutation 2- Forced commutation 3- Reverse recovery

4- Turn - off time

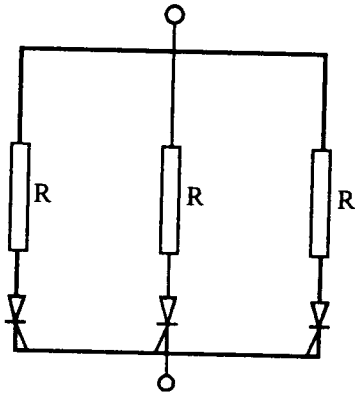
http://levinic.com



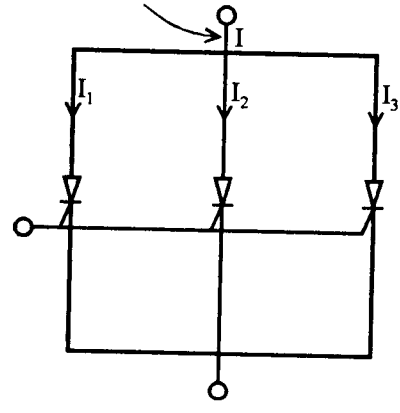
شکل ۲-۱۸ جریان و ولتاژ تریستور در خلال خاموش شدن (درغیاب جریان گیت)

http://levinic.com

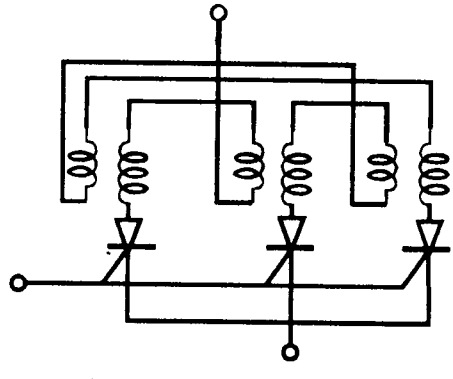
(بازیافت) معکوس[1] (Q_{rr}) موسوم است. گرچه پریود بازیابی معکوس در زمان t_3 کامل می‌شود، لیکن همانطوریکه قبلاً گفته شد بایستی اعمال ولتاژ معکوس تا لحظه t_4 ادامه یابد تا اطمینان حاصل گردد که چگالی حاملهای بار در ناحیه پیوند مرکزی به قدرکافی کاهش یافته واز امکان روشن‌شدن درموقع اعمال مجدد ولتاژ مستقیم پیشگیری شده است. زمان قطع، به جریان آند، به اندازه ولتاژ معکوس اعمال شده و به اندازه و میزان (آهنگ)[2] ولتاژ مستقیم اعمال شده بستگی دارد. این زمان بطور نمونه در محدوده ۱۰ الی ۱۰۰ میکروثانیه قرار دارد و بار ذخیره می‌تواند بطور نمونه برای یک تریستور ۲۰ آمپری در حدود ۲۰ میکروکولمب باشد.



(ب) با مقاومت‌های سری



(الف)اتصال موازی ساده



(پ)با راکتورهای مقسم جریان

شکل ۲-۱۹ اتصال موازی تریستورها

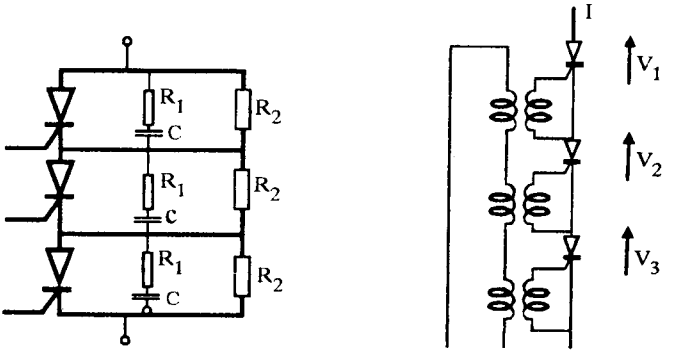
1- Reverse recovery charge 2- Rate

http://levinic.com

۲-۳-۳ عملکرد تریستورهای سری و موازی

برای کاربردهای جریان زیاد می‌توان از اتصال موازی تریستورها استفاده کرد. اگر از اتصال ساده شکل ۲-۱۹ الف استفاده نمائیم بواسطه برخی تفاوت‌های موجود در تریستورها،توزیع جریان بین آنها متفاوت خواهد بود. جهت توزیع یکسان جریانها می‌توان مطابق شکل ۲-۱۹ ب، از سری کردن تریستورها (که در انتخاب آنها دقت لازم به عمل می‌آید که حتی‌المقدور با هم تطبیق داشته باشند) با مقاومت و یا مطابق شکل ۲-۱۹ پ از راکتورهای مقسم استفاده کرد.

درکاربردهای ولتاژزیادمی توان ازاتصال سری تریستورهااستفاده کرد. چنانچه از اتصال شکل شکل ۲-۲۰ الف استفاده نمائیم اختلاف موجود بین تریستورها منجربه تقسیم نابرابر ولتاژ بین تریستورها می‌گردد. جهت توزیع یکسان ولتاژ بین تریستورها، می‌توان از شبکه متعادل کننده ولتاژ[1] شکل ۲-۲۰ ب استفاده کرد. که درآن مقاومت‌های R_2 موجب تقسیم یکسان ولتاژ بین تریستورها در شرایط ماندگار می‌گردند. البته مقاومت‌های R_1 از di/dt زیاد در حالت وصل (روشن) پیشگیری می‌کنند و خازنها اطمینان می‌دهند که هریک از تریستورها در فرایند خاموش شدن (قطع) کاملا" بازیابی می‌شوند.



(الف)اتصال سری ساده (ب)اتصال سری همراه با شبکه برابرکننده ولتاژ

شکل ۲-۲۰ اتصال سری تریستورها

1- Voltage equalizing network

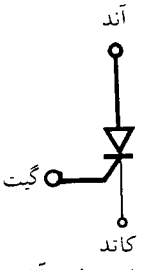
http://levinic.com

تریستوری که در این بخش توصیف شد، تریستوری است که برای اولین بار توسعه یافت، و می‌توان آنرا تریستور معمولی (سنتی)[1] نامید. با پیشرفتهای جدید تریستور قابل قطع

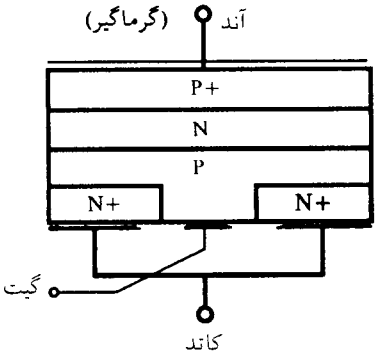
http://levinic.com

تریستور GTO در مقایسه با تریستور معمولی ولتاژ شکست معکوس پائین آن است. برای رفع این نقیصه لازم است مطابق شکل زیر دیودی را باآن سری کرد.

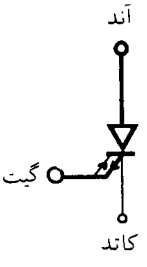
GTO همراه با دیود سری



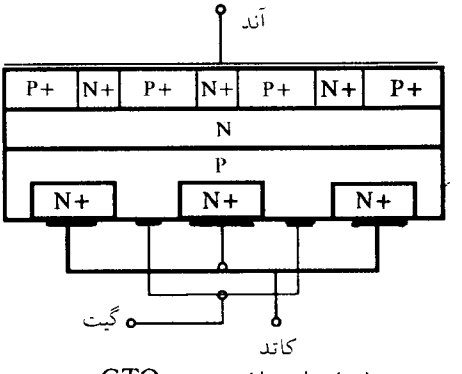
(ب) علامت اختصاری آن



(الف) ساختمان تریستور معمولی



(ت) علامت اختصاری آن



(پ) ساختمان تریستور GTO

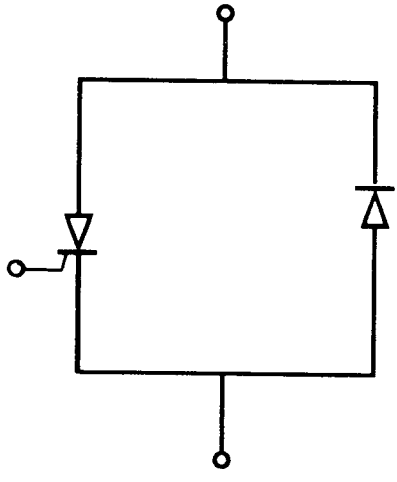
شکل ۲-۲۱ ساختمان و علامت اختصاری تریستور معمولی و تریستور GTO

۲-۵ تریستور نامتقارن

تریستور معمولی دارای دو پیوند P-N است که قادر است ولتاژهای بالا را دو جهت مسدود نماید. و این یکی از نیازمندیهای اساسی در مدارهای یکسو کننده است که در فصل ۳ تشریح خواهد شد. البته در مدارهای معکوس کننده (اینورتر) که در فصل ۴ توصیف خواهد شد، توانایی مسدودکنندگی معکوس مورد نیاز نیست. برای کاهش دادن زمانی که تریستور لازم

http://levinic.com

دارد تا پس از خاموش شدن (قطع) طی آن حالت مسدودکنندگی خود را بازیابد، می‌توان سیلیکون را نازکتر ساخت. لیکن این کار به بهای از دست دادن توانایی تریستور در مسدود کردن ولتاژ معکوس تمام می‌شود. چنین وسیله‌ای هم اکنون به تریستور نامتقارن معروف است. در حقیقت تریستور نامتقارن ترکیب موازی تریستور با یک دیود معکوس است که در یک قرص سیلیکونی واحد قرار داده شده است. (شکل ۲-۲۲) این وسیله همواره در جهت معکوس هدایت می‌کند و در جهت مستقیم، مشابه تریستور معمولی قابل کنترل است. همانطوریکه بعداً ملاحظه خواهیم کرد درمدارهای معکوس کننده (اینورتر) یک دیود معکوس به موازات تریستور قراردارد بنابراین از دست دادن توانایی مسدود کنندگی پی‌آمد کوچکی است، لیکن زمان سوئیچینگ به چند میکرو ثانیه کاهش می‌یابدکه در مقایسه با چندین ده میکرو ثانیه تریستور معمولی حائز اهمیت است.



شکل ۲-۲۲ تریستور نامتقارن

۲-۶ تریاک[1]

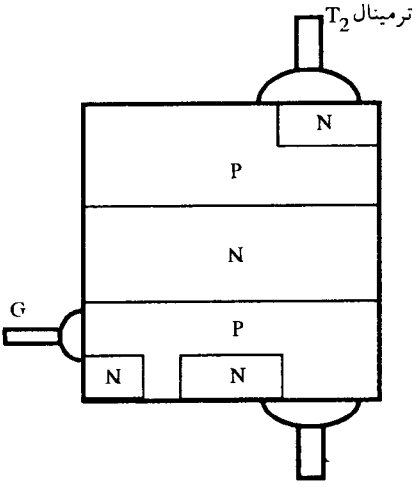
تریاک یک وسیله پنج لایه‌ای است که از نظر الکتریکی نقش دو تریستور با اتصال موازی - معکوس را ایفاء می‌کند. از آنجائیکه اصطلاح آند و کاتد در مورد این وسیله مفهومی ندارد بجای آن اصطلاح ترمینال T_1 و ترمینال T_2 بکار برده می‌شود. تریاک در هر دو جهت یک مسیر P-N-P-N را بین ترمینالهای T_1 و T_2 تشکیل می‌دهد و از اینرو قادر است در هر دو

1- Triac

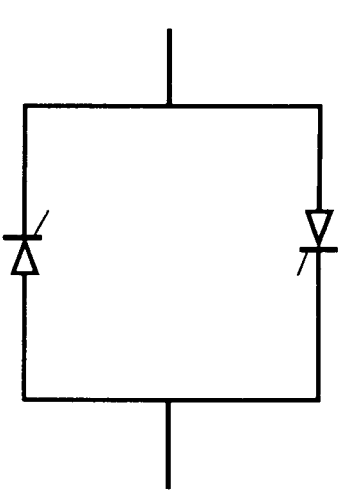
http://levinic.com

جهت هدایت نماید.

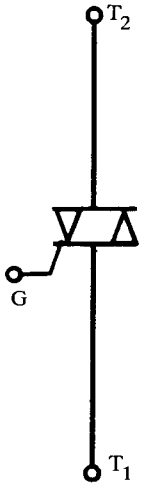
ساختمان و علامت اختصاری آن در شکل ۲-۲۳ نشان داده شده است. تریاک را می‌توان با تزریق جریان گیت مثبت یا منفی روشن (وصل) کرد، اما وقتی T_2 مثبت است، نسبت به جریان تزریقی مثبت و وقتی T_1 مثبت است، نسبت به جریان تزریق منفی حساس‌تر است. البته



(الف) ساختمان



(پ) معادل تریستوری



(ب) علامت اختصاری

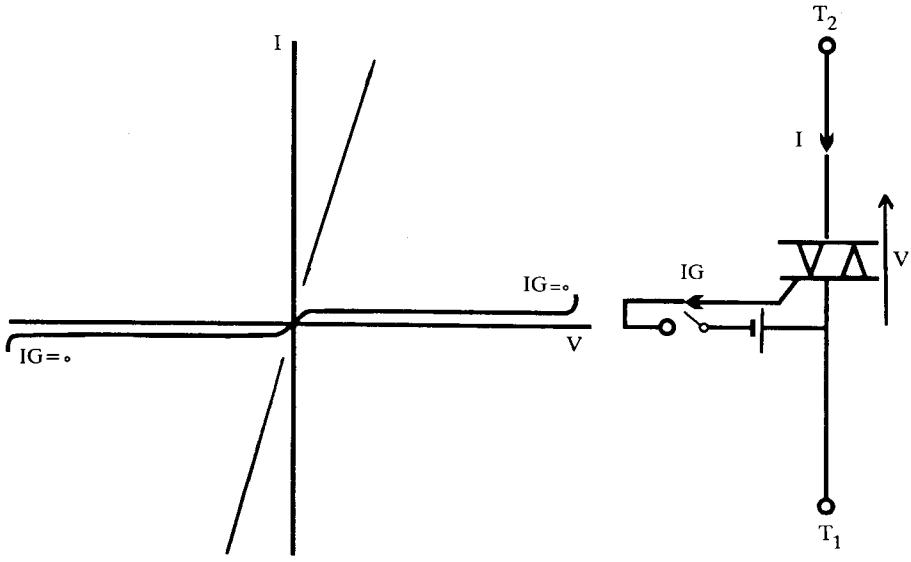
شکل ۲-۲۳ ساختمان، علامت اختصاری و معادل تریستوری تریاک

http://levinic.com

در عمل، همواره از جریان گیت منفی استفاده می‌شود همانطوریکه در مشخصه شکل ۲-۲۴ نشان داده شده است.

۲-۷ دیاک[1]

عنصر نیمه هادی دیاک از تریاک مشتق شده است. در حقیقت دیاک همان تریاک است که در آن گیت حذف شده است و همچنین در جهت مستقیم و معکوس عمل شکست در ولتاژ پائین‌تری رخ می‌دهد. علامت اختصاری آن در شکل ۲-۲۵ نشان داده شده است. از دیاک در



شکل ۲-۲۴ مشخصه تریاک

شکل ۲-۲۵ علامت اختصاری دیاک

1- Diac

http://levinic.com

مدارهای آتش استفاده می‌گردد، همانطوریکه در شکل ۲-۲۶ ملاحظه می‌گردد با تغییرات مقاومت، زاویه فاز ولتاژ دیاک نسبت به ولتاژ منبع تغییر می‌کند و در نتیجه نقطه‌ای از موج که در آن ولتاژ شکست دیاک فرا می‌رسد، تغییر می‌کند و بنابراین نقطه آتش شدن تریاک تغییر می‌نماید.

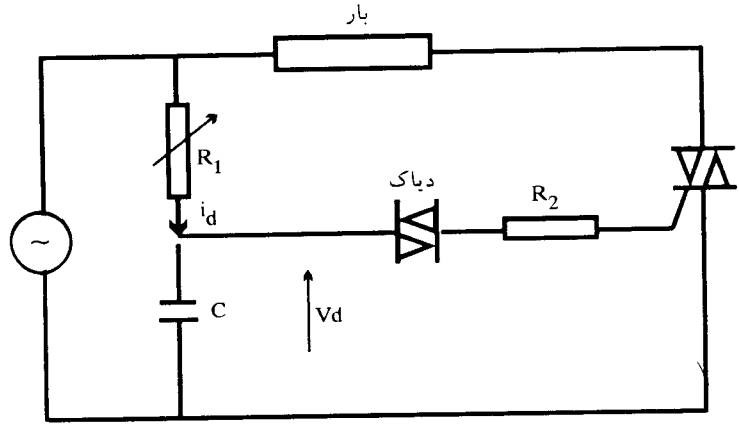
مثال ۲-۲

یک دیاک با ولتاژ شکست ۴۰ V در مدار آتش شکل ۲-۲۶ بکار رفته است. مقاومت متغیر R_1 از ۱۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ Ω تغییر می‌کند، C=۴۷۰ nF و V=۲۴۰ V در فرکانس ۵۰ Hz است. مینیمم و ماکزیمم زاویه تأخیر آتش را پیدا کنید.

حل -

امپدانس خازن $= 1/\omega C = ۶۷۷۳\ \Omega = |Z_C|$

جریان عبوری از مقاومت R_1 و خازن C در موقعی که دیاک هدایت نمی‌کند، برابر است با



شکل ۲-۲۶ مدار آتش تریاک با استفاده از دیاک

$$i_d = ۲۴۰\sqrt{۲}\,Sin(\omega t + \phi) \;/\; Z_d$$

که در آن

$$Z_d = (R_1^{۲} + 1/\omega^{۲}C^{۲})^{\frac{1}{۲}}$$

و

$$\phi = \tan^{-1}(1/\omega R_1 C) \qquad R_1 = ۱۰۰۰\Omega$$

$$\phi = ۸۱/۶^\circ \;,\; Z_d = ۶۸۴۶\ \Omega$$

یا داریم

$$i_d = \frac{۲۴۰\sqrt{۲}}{۶۸۴۶} Sin(\omega t + ۸۱/۶^\circ) = ۰/۰۴۹۶\ Sin(\omega t + ۸۱/۶^\circ)$$

http://levinic.com

ولتاژ دو سر خازن برابر است با $V_c = i_d Z_c$

$V_c = ۰/۰۴۹۶ \ Sin(\omega t + ۸۱/۶°) \times (-j \ ۶۷۷۳)$

$V_c = ۳۳۵/۸ \ Sin(\omega t - ۸/۴°)$

وقتی که دیاک هدایت می‌کند $V_c = ۴۰ \ V$ است بنابراین:

مینیمم زاویه تأخیر آتش $= Sin^{-۱}(۴۰/۳۳۵/۸) + ۸/۴° = ۱۵/۲۴°$

با $R_۱ = ۲۵۰۰۰\Omega$ داریم $Zd = ۲۵۹۰۱ \ \Omega$

ولتاژ دو سرخازن در این حالت برابر است با

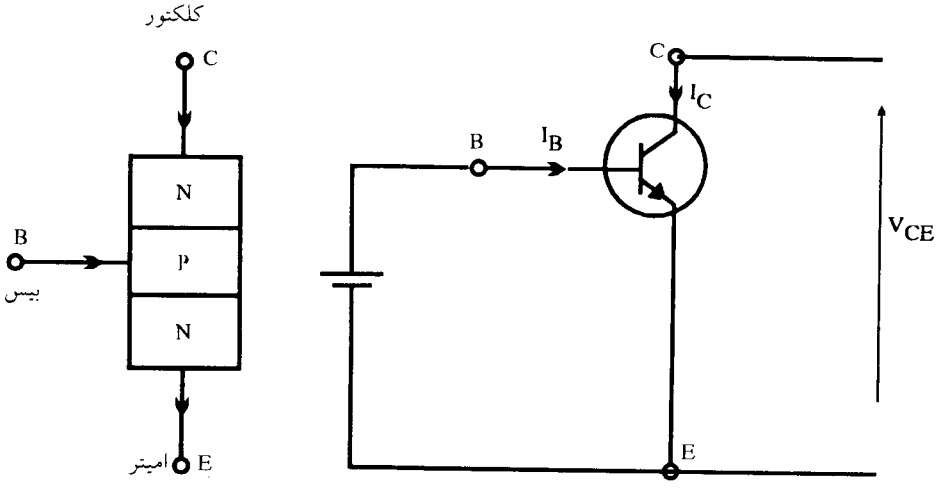
$V_c = ۸۸/۷۶ \ Sin(\omega t - ۷۴/۸۴°)$

در موقع هدایت دیاک $V_c = ۴۰ \ V$ است بنابراین

ماکزیمم زاویه تأخیر آتش $= Sin^{-۱}(۴۰/۸۸/۷۶) + ۷۴/۸۴° = ۱۰۱/۶°$

۲-۸ ترانزیستور قدرت

ترانزیستور وسیله نیمه هادی سه لایه‌ای N-P-N یا P-N-P است همانطوریکه در اشکال ۲-۲۷ و ۲-۲۸ نشان داده شده است. در محدوده کار ترانزیستور، جریان کلکتور I_C تابعی از جریان بیس I_B است یعنی $I_C = \beta I_B$ است و در یک ولتاژ کلکتور- امیتر (V_{CE}) معین یک تغییر در جریان بیس منجر به یک تغییر تقویت شده در جریان کلکتور می‌گردد. نسبت این دو جریان در مرتبه ۱۵ الی ۱۰۰ است. مشخصه ترانزیستور NPN در شکل ۲-۲۹ نشان داده



شکل ۲-۲۷ ساختمان و علامت اختصاری ترانزیستور N-P-N