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.

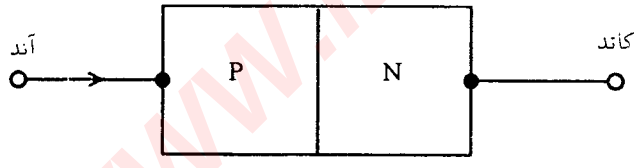
1-Semiconductor 2- Covalent bond 3- Hole

www.IEPE.ir

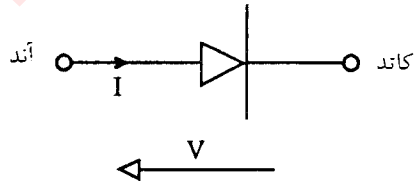
میزان وارد کردن ناخالصی به مقدار ۱ جزء در $۱۰^{۷}$ اتم است. در نیمه هادی نوع N الکترون‌ها حامل‌های اکثریت[1] جریان و حفره‌ها حامل‌های اقلیت[2] هستند. عکس این مطلب در مورد نیمه هادی نوع P صادق است. بر حسب میزان ناخالصی قابلیت هدایت نیمه‌هادی نوع N و نوع P در مقایسه با سیلیکون خالص، بطور وسیعی افزایش می‌یابد.

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]، الکتروهای 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

www.iEE.ir

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 - به آن اعمال شود، میدان 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 که تحریک حرارتی[2] باعث می‌شود که تعدادی از پیوندهای هم ظرفیتی در ساختمان کریستالی شکسته شده 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 عبور کرده و یک جریان 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 درجه حرارت، زیاد می‌شود زیرا تعداد 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 حد می‌رسد شکست (فروپاشی) معکوس[4] رخ می‌دهد 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 معنی که پیوندهای هم ظرفیتی در اثر میدان الکتریکی شدیدپاره می‌شوند و الکترون‌ها آزاد می‌گردند و دیگر شکست بهمنی[6] است یعنی اینکه با افزایش ولتاژ معکوس حاملهای اقلیت شتاب گرفته و انرژی لازم را بدست آورده طوریکه 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

WWW.IEEE.IR

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° 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.

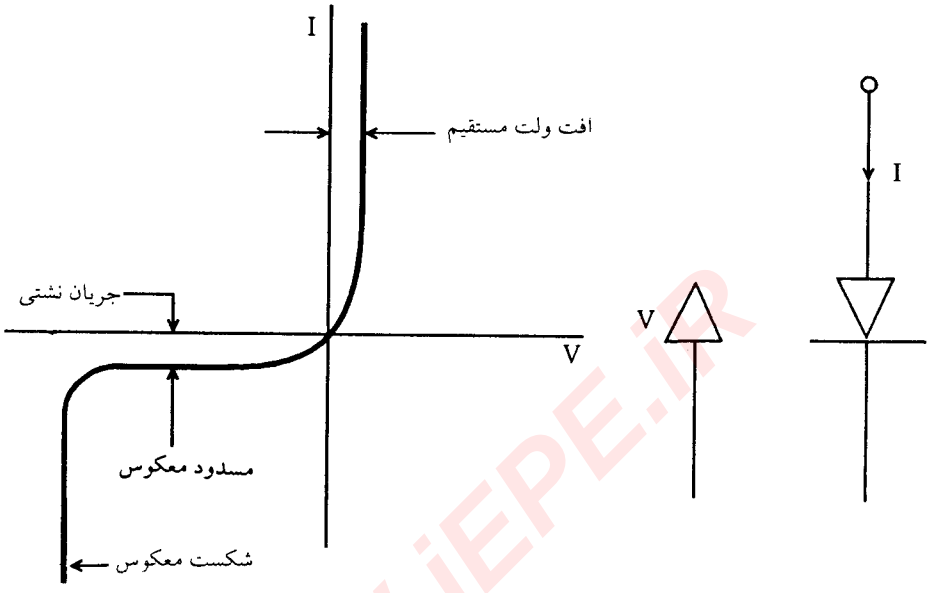
اگر V مثبت‌باشدومقدارآن‌خیلی‌بزرگتراز ηV_T باشد جریان دربایاس مستقیم برابراست با

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

1- Boltzman

WWW.iEPE.iR

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

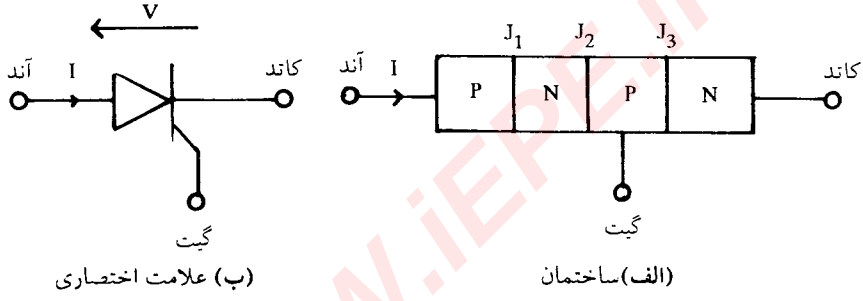
1- Thyristor 2- Transistor 3- Tyratron

4- Semiconductor devices 5- Junction 6- Gate

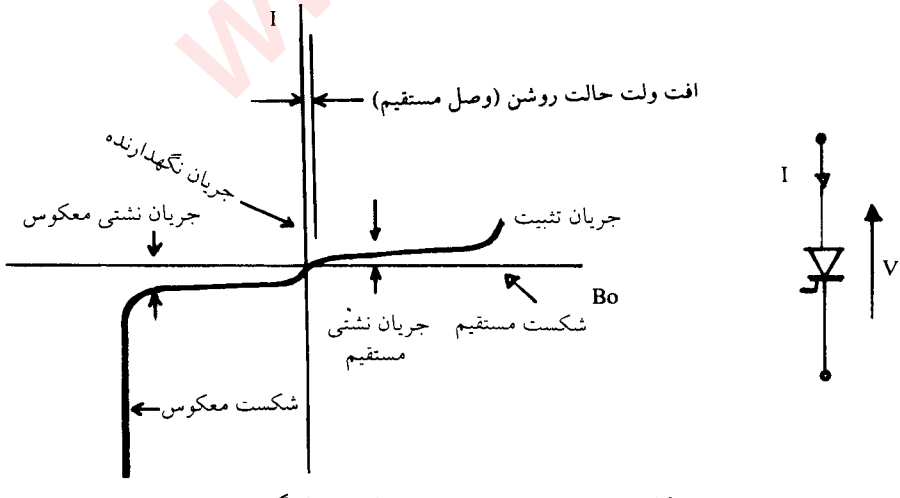
WWW.iEPE.IR

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:

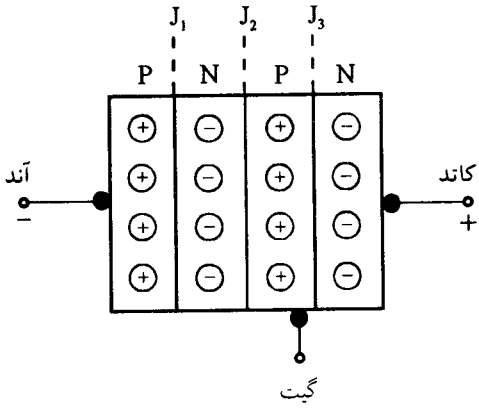


شکل ۲-۳ تریستور

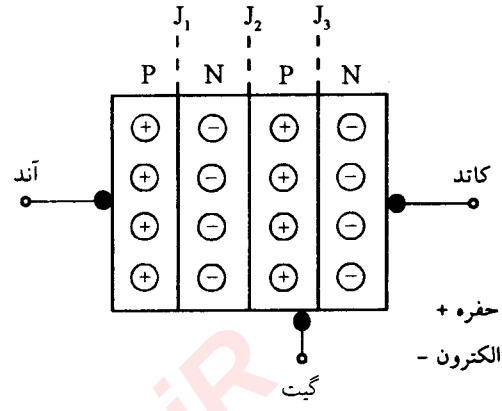


شکل ۲-۴ مشخصه تریستور در غیاب جریان گیت

WWW.iEPE.iR



شکل ۲-۶ توزیع بار با اعمال ولتاژ منفی



شکل ۲-۵: توزیع بار بدون اعمال ولتاژ

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] قرار دارد.

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.

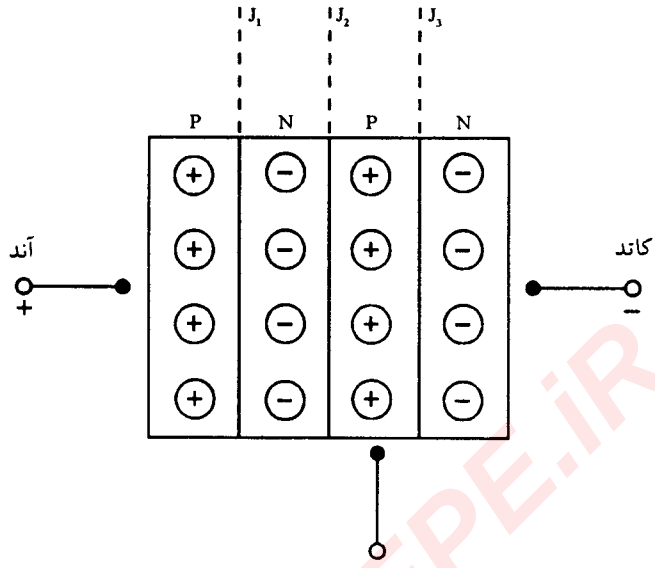
پیوند J_3 همانند پیوند J_1 از حاملهای بار پر شده است و عبور جریان را آزاد می‌کند.

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

WWW.IEPE.IR



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 تقریبا" 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 vollage

2- Laiching current

3- On state

WWW.IEPE.IR

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 با کاهش جریان آند به میزان کمتر از جریان نگهدارنده I_h عملی می‌شود.

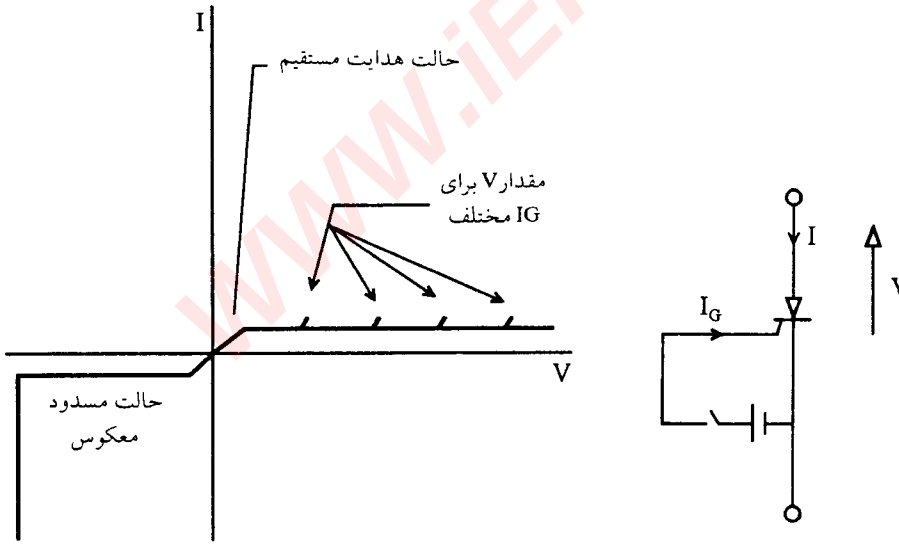
البته باید توجه داشت که در این بحث فرض براین بوده است که جریان گیت صفر باشد و تحت چنین شرایطی این نحوه روشن و خاموش کردن تریستور مورد بررسی قرار گرفته است. لیکن باید دانست که در روشن کردن تریستورهااین روش معمول نبوده، بلکه با بکارگرفتن کنترل گیت می‌توان آن را به سهولت و در ولتاژهای کمتر از V_{BO} روشن 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 همانطوریکه 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

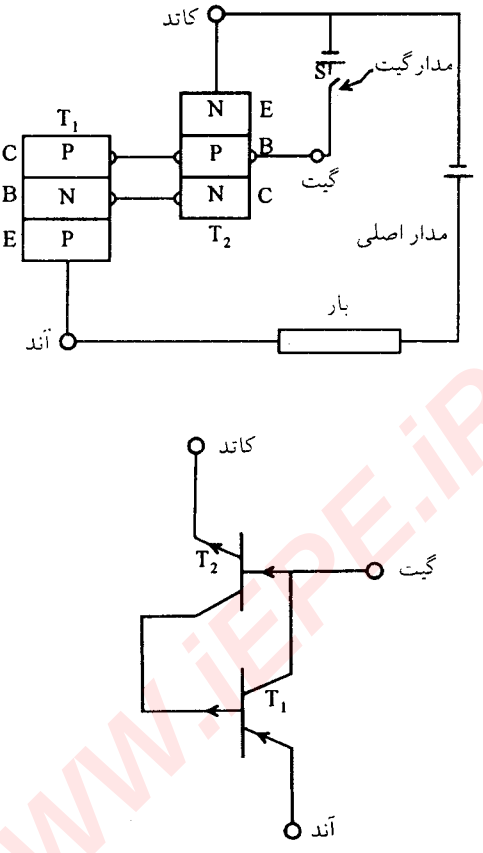
WWW.IEEE.IR

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

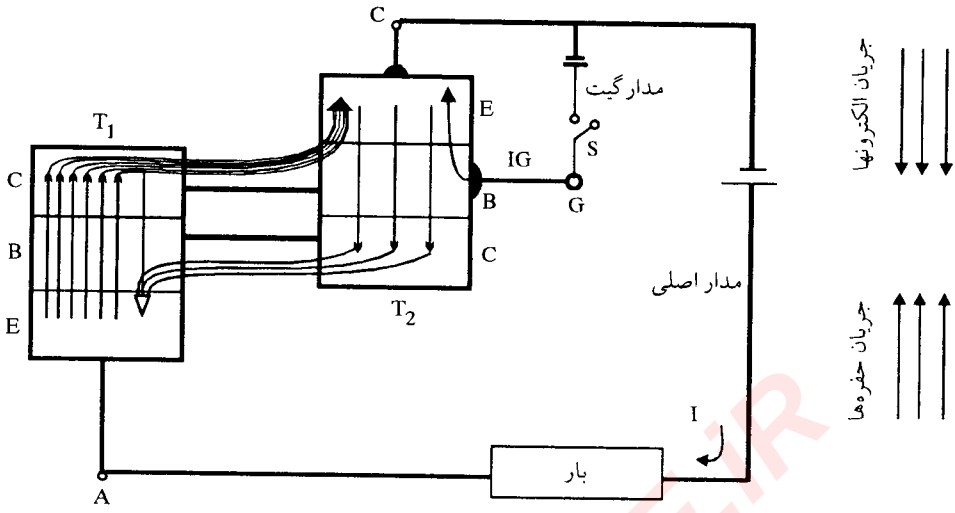


شکل ۲-۹ مدل دو ترانزیستوری تریستور

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

WWW.iEPE.iR



شکل ۲-۱۰ مدار معادل دو ترانزیستوری تریستور

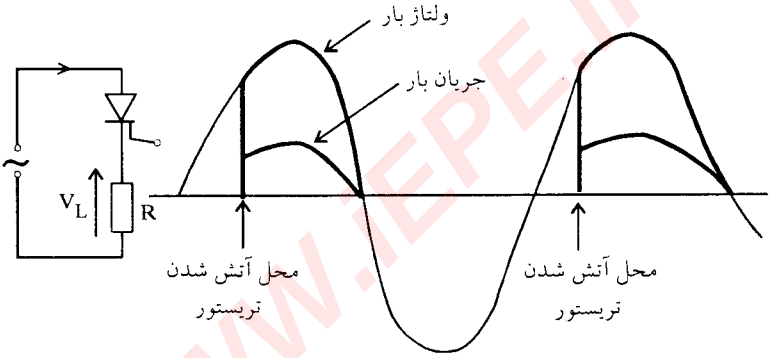
T_1 گذشته وارد کلکتور T_1 می‌شوند واز آنجا به علت ارتباط کلکتور با بیس T_2 وارد بیس ترانزیستور T_2 شده و به علت منفی بودن شدید امیتر T_2 وارد امیتر T_2 می‌شود.

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.

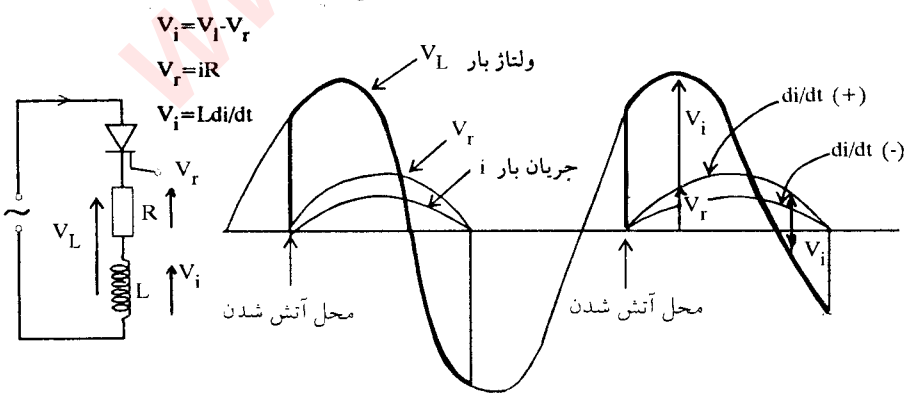
بنابراین می‌توان گفت که جریان گیت در T_2 باعث جریان کلکتور می‌شود که در ضمن به‌عنوان جریان بیس در T_1 موثر است و باعث می‌شود که جریان الکترونی کلکتور T_1 راه بیفتد. همین جریان الکترونی کلکتور T_1 به عنوان جریان بیس از T_1 به T_2 برمی‌گردد. اگر این جریان‌های کلکتور T_1 و T_2 جریان حفره‌ای و الکترونی که 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.

WWW.IEPE.IR

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 $V_i = L di/dt$ 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

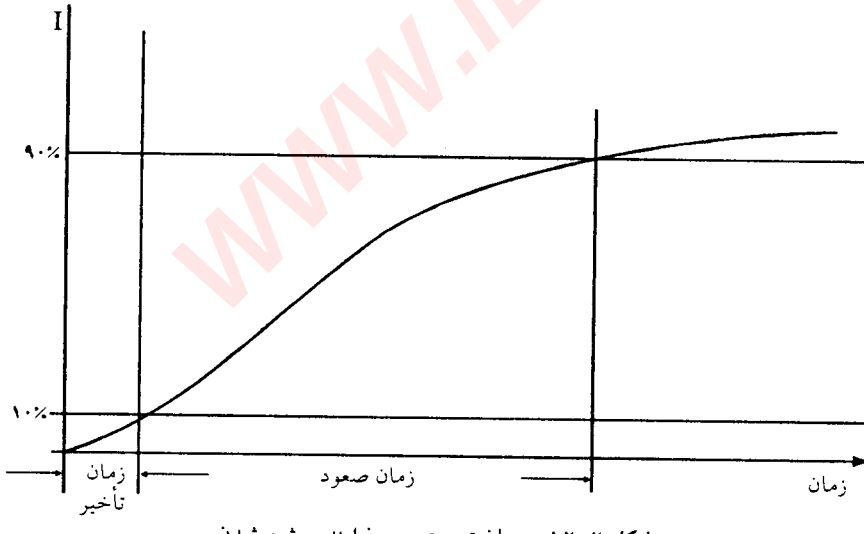
شکل ۲-۱۱ عملکرد تریستور در بارهای مختلف

WWW.IEPE.IR

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

WWW.iEPE.IR

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.

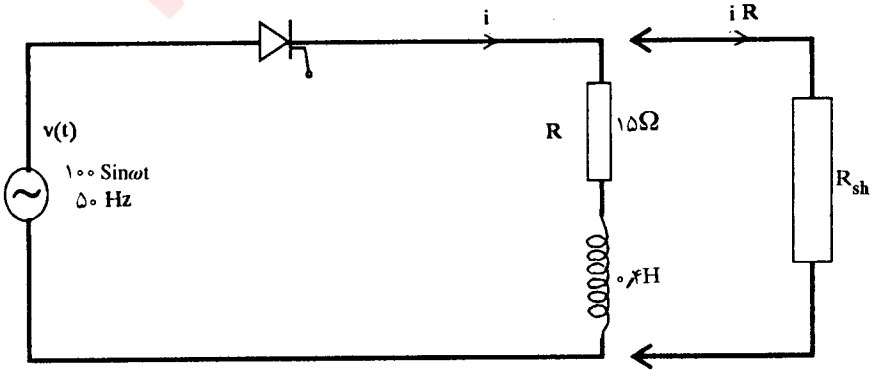
با اتصال دادن مقاومت R_{Sh} به مدار، جریان i_R ازآن می‌گذرد بنابراین جریان عبوری از تریستور برابراست با :

$$i_T = i + i_R$$

برای روشن شدن بایستی

$$i + i_R = ۴۰ \text{ mA}$$

$$i_R = ۴۰ - ۱۲/۴ = ۲۷/۶ \text{ mA}$$



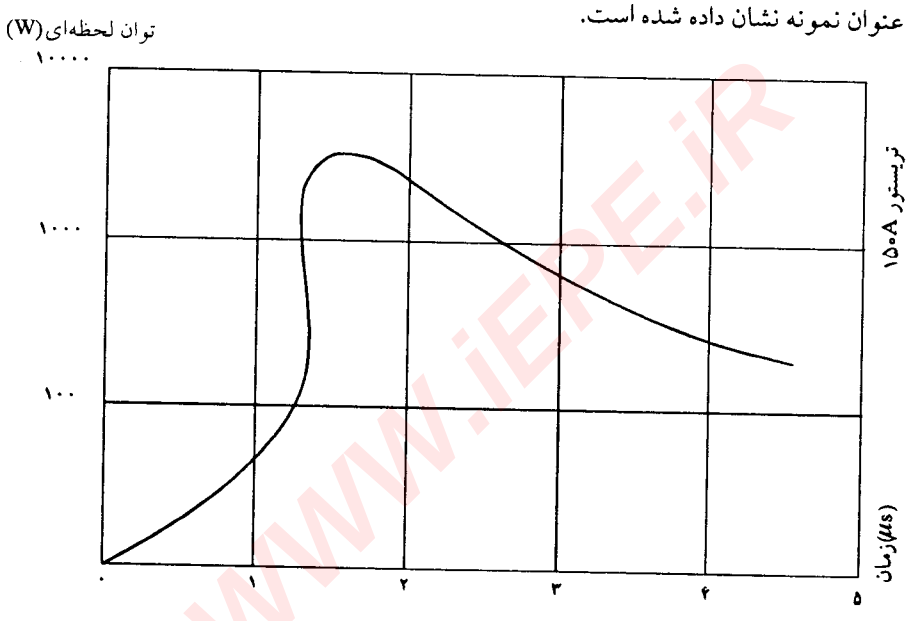
شکل ۲-۱۳ مربوط به مثال ۲-۱

www.IEPE.ir

حداکثر مقدار R_{Sh} برابر خواهد بود با

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

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.

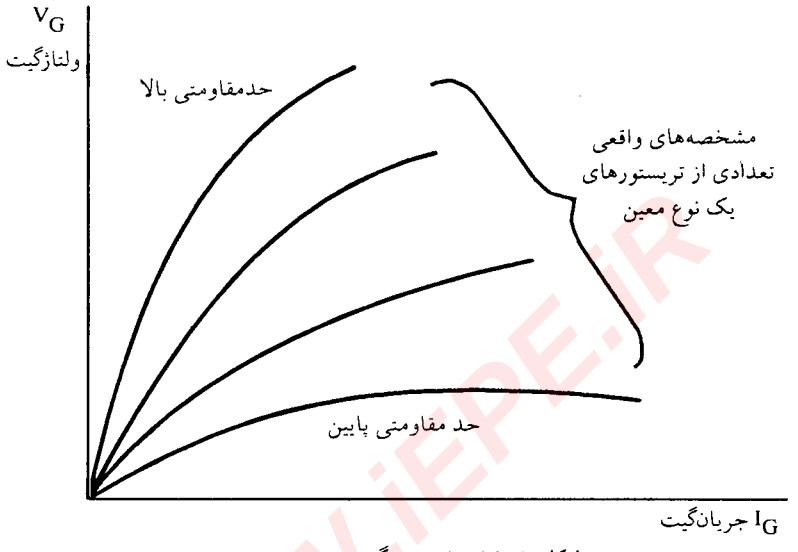


شکل ۲-۱۴ توان لحظه‌ای تریستور در خلال روشن شدن

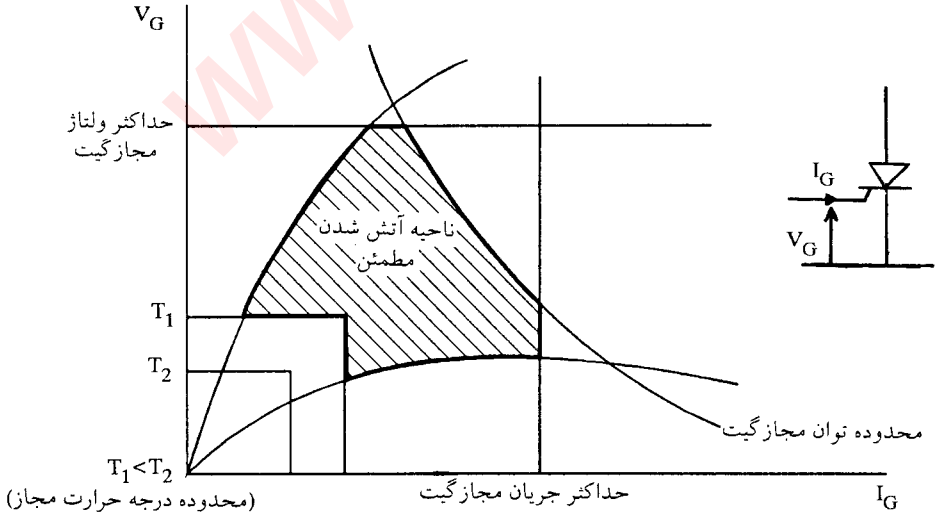
سیگنال گیتی که برای روشن کردن تریستور لازم است تحت تأثیر مشخصه ولتاژ جریان گیت قراردارد. مشخصه گیت - کاتد تریستور مشابه مشخصه یک پیوند P-N است. تریستورهای تولید شده در یک نوع معین هر یک دارای مشخصه‌ای مطابق شکل ۲-۱۵ هستند که در محلی بین حد مقاومتی پائین و حد مقاومتی بالا قرار می‌گیرند. علاوه بر موارد 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

WWW.iEPE.iR

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

WWW.iEPE.IR

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)

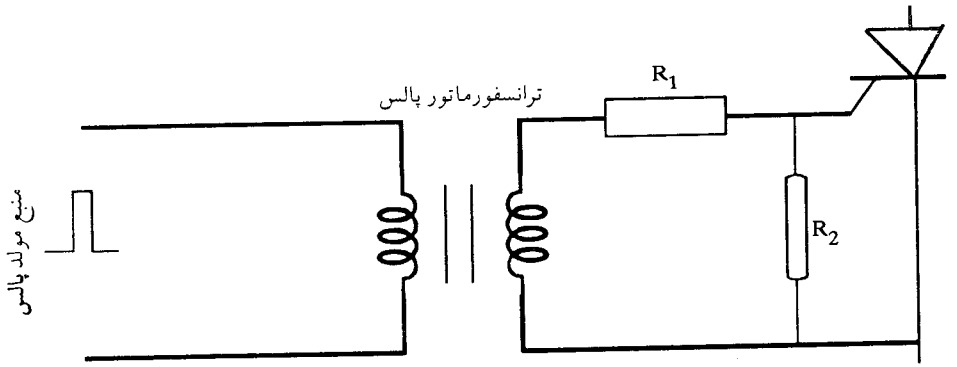
وقتی که تریستور بوسیله جریان گیت روشن گردید، گیت نقش کنترلی خود را از دست می‌دهد و خاموش کردن تریستور تنها با کاهش جریان آند به مقدار کمتر از جریان نگهدارنده امکان پذیراست. در مدارهای ac که جریان دارای مقدار صفر طبیعی است، تریستور بطور

1- Pulse length

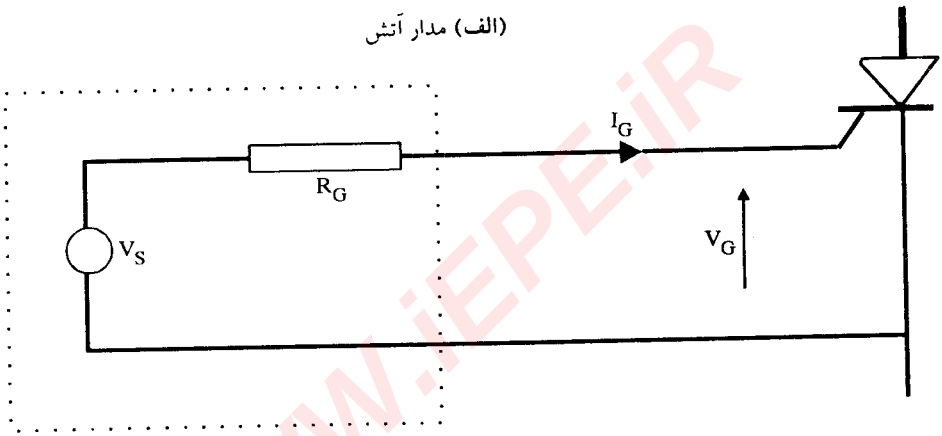
2- Single pulse

3- Train of pulses

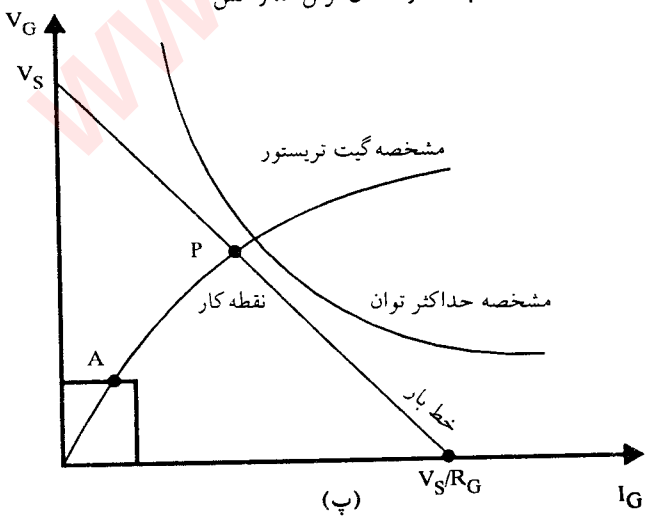
www.IEPE.ir



(الف) مدار آتش



(ب) مدار معادل تونن مدار آتش



(پ)

شکل ۲-۱۷ : عملکرد گیت و نقطه کار

WWW.iEPE.iR

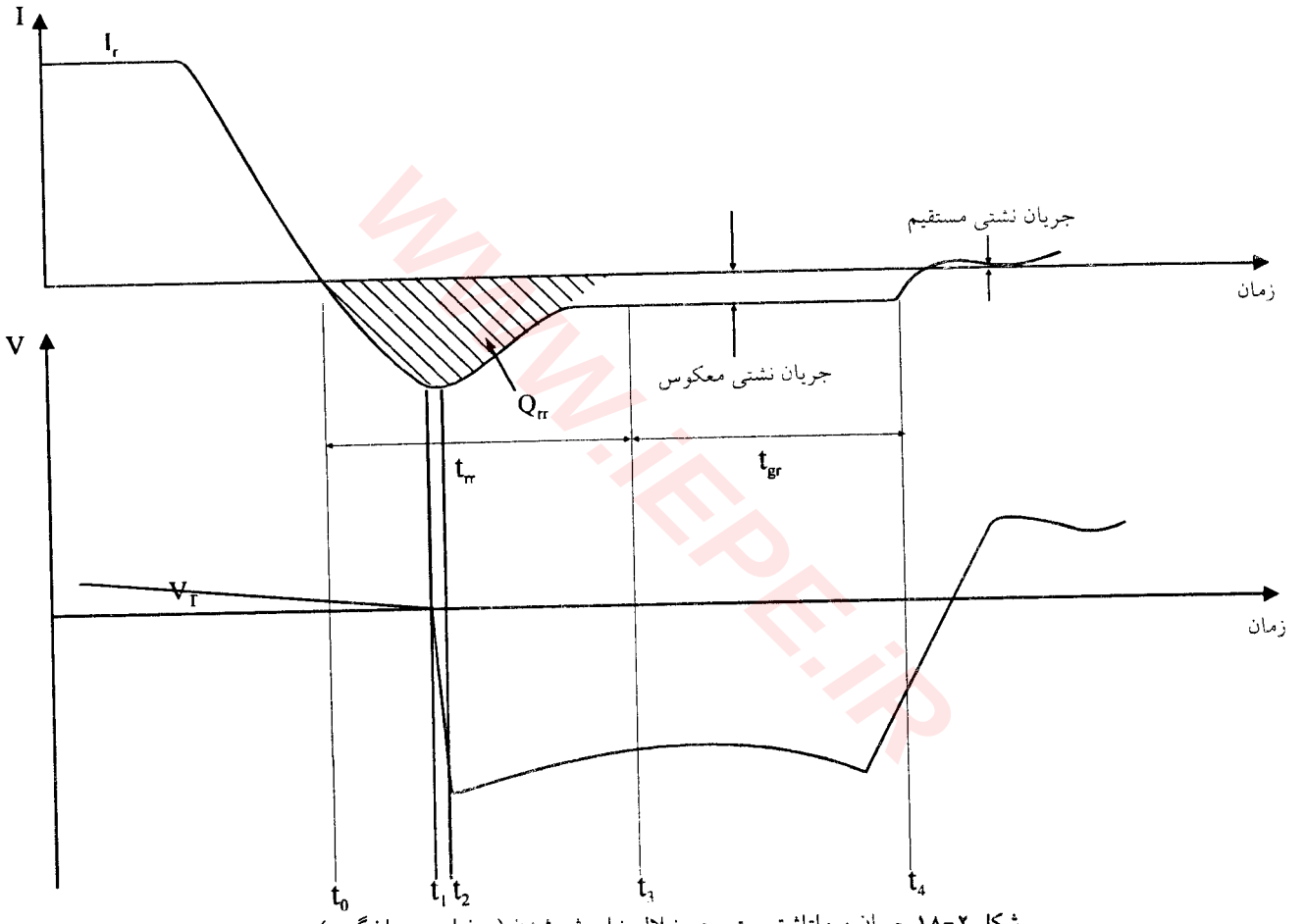
خودکار خاموش می‌شود (کموتاسیون طبیعی)[1]. در مدارهای dc که مقدار صفر طبیعی برای جریان وجود ندارد، می‌توان جریان مستقیم را از طریق شنت کردن تریستور توسط یک وسیله دیگر، کاهش داد یا اینکه با اعمال ولتاژ معکوس به دوسر آند و کاتد مقدار جریان گذرنده از تریستور را بطور اجباری به صفر رساند(کموتاسیون اجباری).[2] 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

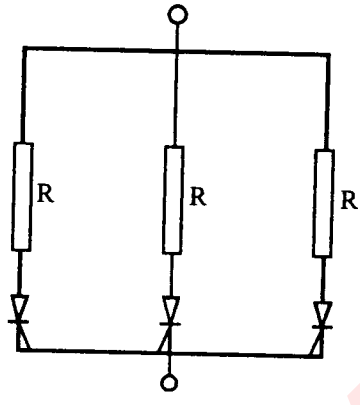
WWW.IEEE.IR



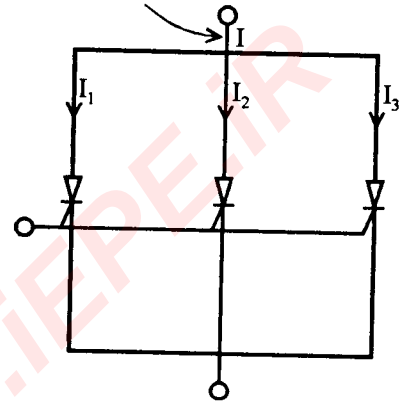
شکل ۲-۱۸ جریان و ولتاژ تریستور در خلال خاموش شدن (درغیاب جریان گیت)

www.IEPE.ir

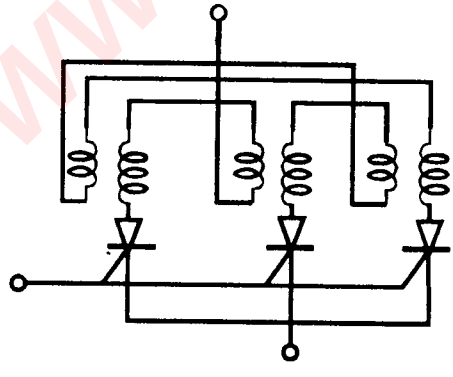
(بازیافت) معکوس[1] (Q_{rr}) موسوم است. گرچه پریود بازیابی معکوس در زمان t_3 کامل می‌شود، لیکن همانطوریکه قبلاً گفته شد بایستی اعمال ولتاژ معکوس تا لحظه t_4 ادامه یابد تا اطمینان حاصل گردد که چگالی حاملهای بار در ناحیه پیوند مرکزی به قدرکافی کاهش یافته واز امکان روشن‌شدن درموقع اعمال مجدد ولتاژ مستقیم 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

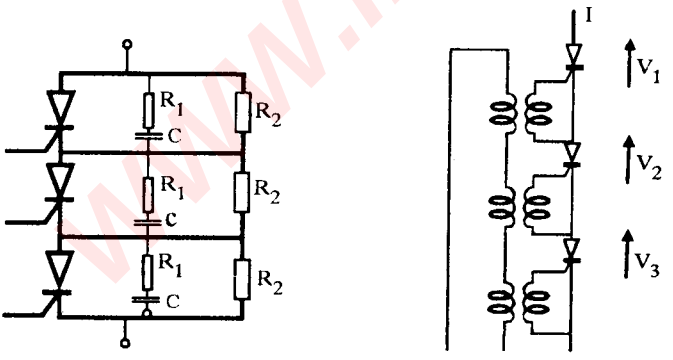
1- Reverse recovery charge 2- Rate

WWW.iEPE.IR

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 توان‌ازاتصال‌سری 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) کاملاً بازیابی می‌شوند.



(الف)اتصال سری ساده

(ب)اتصال سری همراه با شبکه برابرکننده ولتاژ

شکل ۲-۲۰ اتصال سری تریستورها

1- Voltage equalizing network

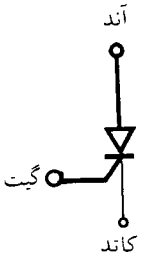
www.iEPE.ir

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

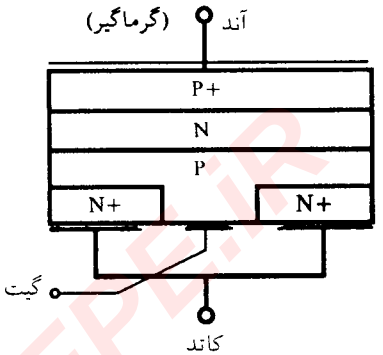
WWW.IEPE.IR

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.

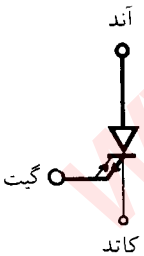
GTO همراه با دیود سری



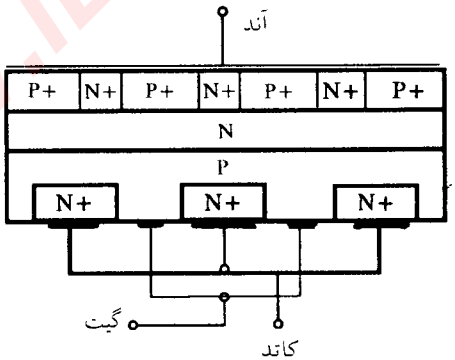
(ب) علامت اختصاری آن



(الف) ساختمان تریستور معمولی



(ت) علامت اختصاری آن



(پ) ساختمان تریستور GTO

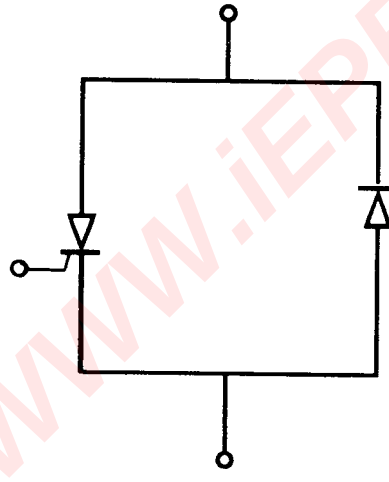
شکل ۲-۲۱ ساختمان و علامت اختصاری تریستور معمولی و تریستور GTO

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

www.iEPE.ir

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]

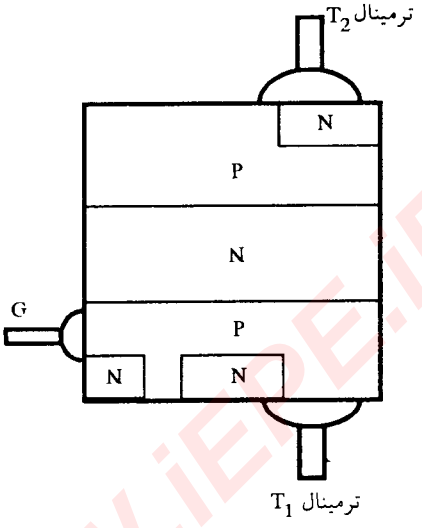
تریاک یک وسیله پنج لایه‌ای است که از نظر الکتریکی نقش دو تریستور با اتصال موازی - معکوس را ایفاء می‌کند. از آنجائیکه اصطلاح آند و کاتد در مورد این وسیله مفهومی ندارد بجای آن اصطلاح ترمینال T_1 و ترمینال T_2 بکار برده می‌شود. تریاک در هر دو جهت یک مسیر P-N-P-N را بین ترمینالهای T_1 و T_2 تشکیل می‌دهد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

1- Triac

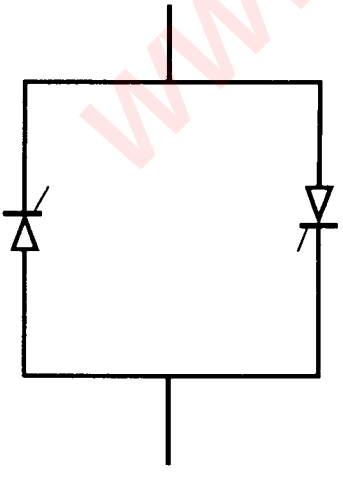
WWW.iEPE.IR

جهت هدایت نماید.

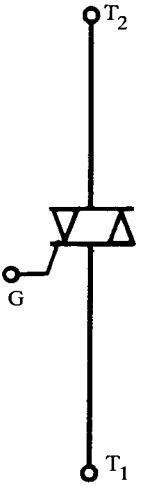
ساختمان و علامت اختصاری آن در شکل ۲-۲۳ نشان داده شده است. تریاک را می‌توان با تزریق جریان گیت مثبت یا منفی روشن (وصل) کرد، اما وقتی T_2 مثبت است، نسبت به جریان تزریقی مثبت و وقتی T_1 مثبت است، نسبت به جریان تزریق منفی حساس‌تر است. البته



(الف) ساختمان



(پ) معادل تریستوری



(ب) علامت اختصاری

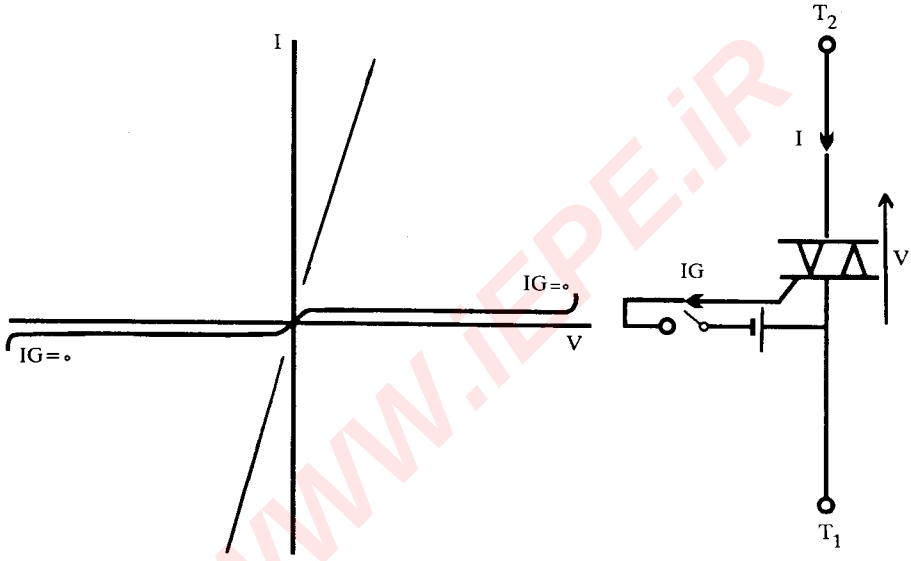
شکل ۲-۲۳ ساختمان، علامت اختصاری و معادل تریستوری تریاک

WWW.iEPE.iR

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

WWW.IEPE.iR

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.

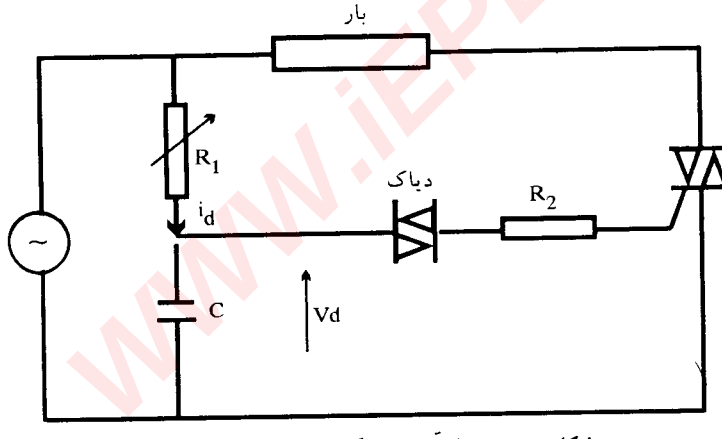
مثال ۲-۲

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

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

که در آن

$$Z_d = (R_1^{۲} + ۱/\omega^{۲}C^{۲})^{\frac{۱}{۲}}$$

و

$$\phi = \tan^{-۱}(۱/\omega R_1 C) \qquad R_1 = ۱۰۰۰\Omega$$

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

یا داریم

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

WWW.iEPE.iR

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

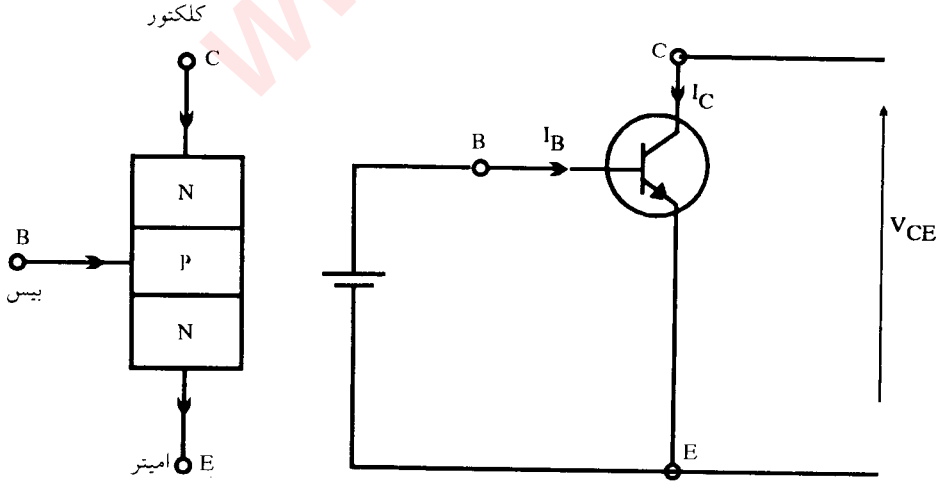
$V_c = ۸۸/۷۶ \ Sin(\omega t - ۷۴/۸۴°)$

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

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

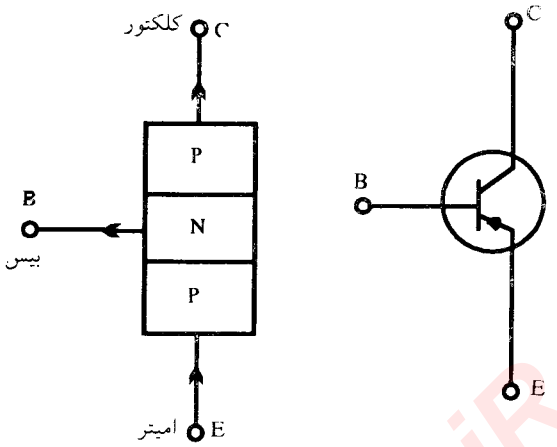
۲-۸ ترانزیستور قدرت

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

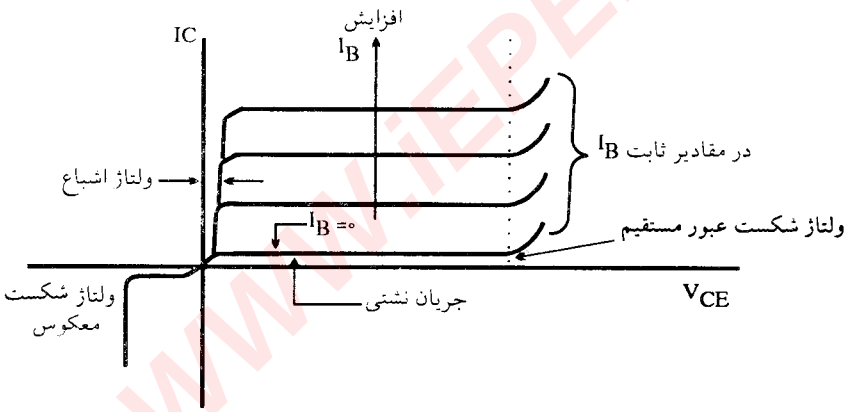


شکل ۲-۲۷ ساختمان و علامت اختصاری ترانزیستور N-P-N

WWW.IEPE.IR



شکل ۲-۲۸ ساختمان و علامت اختصاری ترانزیستور P-N-P



شکل ۲-۲۹ مشخصه امیتر مشترک ترانزیستور N-P-N

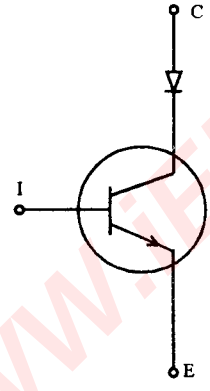
شده است. ملاحظه می‌شود که مشابه وسایل قبلی با افزایش ولتاژ کلکتور-امیتر (V_{CE}) شکست مستقیم رخ می‌دهد. البته با معکوس کردن ولتاژ کلکتور-امیتر، پیوند بیس-امیتر در ولتاژ نسبتاً کم (مثلاً ۱۰V) شکسته می‌شود، از اینرو ترانزیستور در مد معکوس کار نمی‌کند. بنابراین می‌توان مطابق شکل ۲-۳۰ دیودی را با ترانزیستور سری کرد تا آنرا در مقابل ولتاژهای معکوس V_{CE} حفاظت کند.

تلفات توان در ترانزیستور تابعی از حاصلضرب ولتاژ کلکتور-امیتر (V_{CE}) و جریان کلکتور (I_C) می‌باشد. اگر چنانچه در شکل ۲-۳۱ جریان بیس تغییر نماید تااینکه جریان بار را در مدار کلکتور کنترل کند، آنگاه ولتاژ بزرگی در دوسر ترانزیستور ظاهر می‌شود. به عنوان مثال،

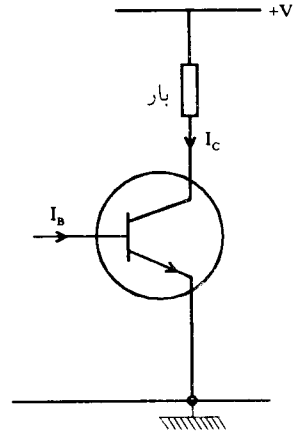
WWW.IEPE.IR

اگر V = ۲۰۰V باشد و جریان بیس I_B تنظیم شود طوریکه جریان A ۱۰ را در بار ۱۰Ω ایجاد کند، آنگاه در ترانزیستور ۱۰۰V افت ولت خواهیم داشت. بنابراین در ترانزیستور افت تلفات برابر ۱kW خواهیم داشت و راندمان ۵۰درصد خواهد بود. در نتیجه این شرایط هم از نقطه نظر تلفات و مقدار نامی (ظرفیت مجاز) و هم از نقطه نظر راندمان غیرقابل قبول است.

در عمل، در کاربردهای الکترونیک قدرت از ترانزیستور به عنوان یک سوئیچ قابل کنترل استفاده می‌شود. ودارای دو حالت (مُد) است وقتی جریان بیس صفر است ترانزیستور قطع (OFF) است و نقش یک سوئیچ باز را ایفا می‌کند و وقتی به ازاء جریان معین بیس ترانزیستور به اشباع می‌رود(ON)، نقش یک سوئیچ بسته را دارد. همانطوریکه ملاحظه کردیم کاربرد آن در شرایط دیگر با محدودیت تلفات توان مواجه است (شکل ۲-۳۲).

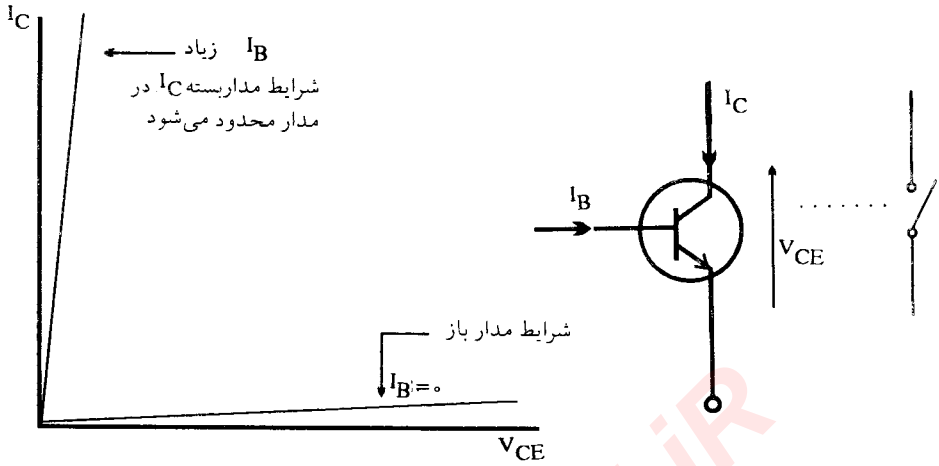


شکل ۲-۳۰ ترانزیستور با دیود سری



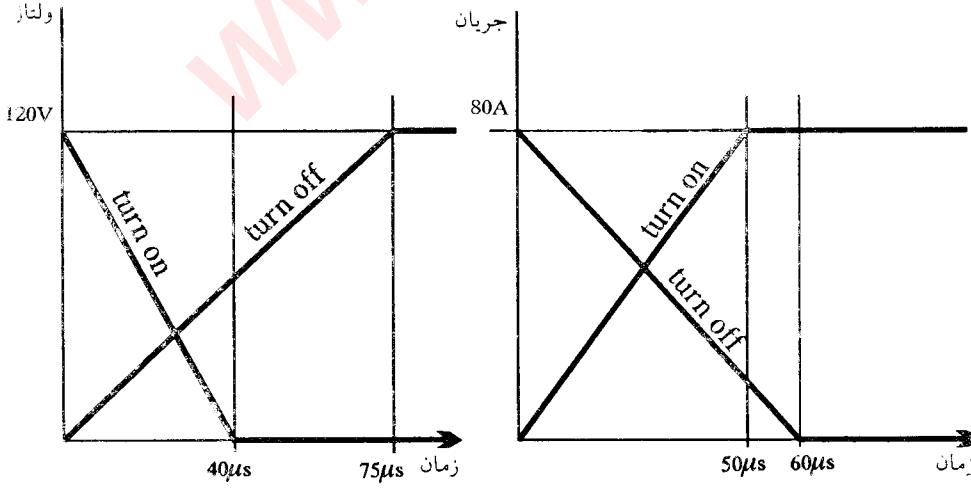
شکل ۲-۳۱ بارکنترل شده توسط ترانزیستور

WWW.IEPE.IR



شکل ۲-۳۲ عملکرد ترانزیستور به عنوان یک سوئیچ (قطع و وصل)

وقتی که ترانزیستور نقش سوئیچ را دارد تلفات توان کوچک است و این تلفات از جریان نشتی کم حالتِ مدار باز و از ولتاژ اشباع و جریان کلکتور حالتِ مدار بسته، ناشی می‌شود (بطور نمونه برای ترانزیستور قدرت سیلیکون ولتاژ اشباع در حدود V ۱/۱است). با وجود این، تلفات ناشی از سوئیچینگ ترانزیستور می تواند خیلی زیاد باشد زیرا در خلال قطع و وصل یا سوئیچینگ، ولتاژ دو سر ترانزیستور و جریان درون آن می‌تواند زیاد باشد و ازحاصلضرب جریان و ولتاژ و زمان سوئیچینگ، تلفات انرژی مربوط به یک عمل سوئیچینگ (کلیدزنی)



شکل ۲-۳۳ مشخصه قطع و وصل ترانزیستور

WWW.IFRE.IR

حاصل می‌شود. در فرکانس سوئیچینگ بالا[1]، تلفات غالب ناشی از عمل سوئیچینگ می‌باشد. تلفات دقیق سوئیچینگ علاوه بر اینکه تابعی از شکل جریان بیس است، تابعی از پارامترهای مدار باراست.

مثال ۲-۳

ترانزیستوری دارای مشخصه سوئیچینگ نشان داده شده در شکل ۲-۳۳ است. اگر تلفات توان متوسط در مقدار ۲۰۰W محدود باشد، حداکثر فرکانس سوئیچینگ را بدست آورید.

حل- تلفات انرژی درترانزیستور برابر است با: $\int_0^t i_C V_{CE}\, dt$

تلفات انرژی در خلال روشن شدن برابر است با:

$$\int_0^{۴۰\times۱۰^{-۶}} ۱۲۰(۱-۲/۵\times۱۰^{۴}\, t) \times ۱/۶\times۱۰^{۶}\, t\,dt = ۵۱\ \text{mJ}$$

تلفات انرژی در خلال خاموش شدن برابر است با:

$$\int_0^{۶۰\times۱۰^{-۶}} ۱/۶\times۱۰^{۶} t \times ۸۰\,(۱ - ۱/۶۶۷\times۱۰^{۴} t)\,dt = ۷۶/۸\ \text{mJ}$$

تلفات انرژی در یک سیکل برابر است با $۵۱ + ۷۶/۸ = ۱۲۷/۸$ mJ

تعداد سیکل در یک ثانیه برابر است با $۲۰۰/۰/۱۲۷۸=۱۵۶۴/۹$

بمنظور کاهش دادن زمان وصل و در نتیجه کاهش دادن تلفات در فرایند روشن کردن تریستور، از جریان بیس زیاد استفاده می‌شود، تا اینکه ترانزیستور به سرعت وارد اشباع گردد و روشن شدن سریع حاصل شود. سپس جریان بیس کاهش داده می‌شود و در مقداری نگاه داشته می‌شود که برای در اشباع نگاه داشتن ترانزیستور کفایت نماید تا بدینوسیله تلفات مدار بیس به حداقل برسد. برای خاموش کردن ترانزیستور بایستی جریان بیس با سرعت (آهنگ) ممکن کاهش یابد. البته بواسطه وقوع پدیده پیچیده‌ای موسوم به شکست ثانوی[2] محدودیتی بر این سرعت کاهش جریان بیس اعمال می‌گردد(درآینده توضیح داده می‌شود). این پدیده که در اثر گذراهای سریع رخ می‌دهد منجربه خرابی ترانزیستور می‌گردد. از اینرو در خاموش کردن ترانزیستور، لازم است جریان بیس با سرعتی (آهنگی) کاهش یابد که جریان کلکتور بتواند تعقیب نماید تا از وقوع شکست ثانوی احتراز گردد. جهت بهبود فرایند خاموش کردن (قطع) جریان بیس معکوسی به ترانزیستور اعمال می‌گردد و در شرایط قطع بایاس معکوس حفظ می‌گردد.

1- High switching frequency

2- Secondary breakdown

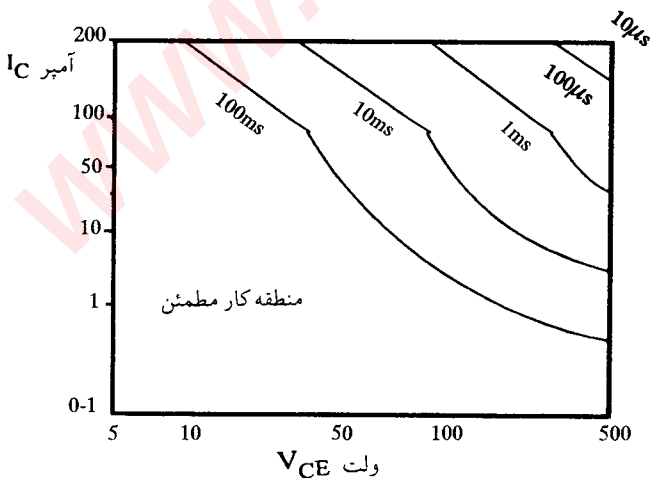
www.iEPE.ir

برای اینکه از ترانزیستور بطور کامل و بدون گرمایش زیاد در خلال سوئیچینگ، بهره‌برداری شود بایستی از منطقه کار مطمئن[1] نشان داده شده در شکل ۲-۳۴ استفاده گردد. وقتی عمل سوئیچینگ بین دو حالت نشان داده شده در شکل ۲-۳۲ انجام می‌گیرد، ضروری است که در خلال پریود سوئیچینگ، همواره مقادیر لحظه‌ای جریان و ولتاژ در منطقه چهارگوشی شکل ۲-۳۴ قرار گیرد. فقط برای زمان سوئیچینگ[2] خیلی کوتاه این ناحیه تقریباً مستطیل است، و تلفات توان لحظه‌ای زیاد که بتواند قابل تحمل باشد برای زمان‌های سوئیچینگ بیشتر، بطور فزاینده محدود می‌گردد و همانطوریکه در شکل ۲-۳۴ نشان داده شده است گوشه مستطیل خارج از منطقه کار مطمئن قرار می‌گیرد.

ترانزیستور قدرت در مقایسه با تریستور، قادر است با سرعت بیشتری سوئیچ گردد، بطور نمونه زمان سوئیچینگ به چند میکروثانیه تنزل می‌یابد، لیکن با توجه به اینکه لازم است در شرایط روشن (ON) تغذیه جریان بیس تأمین گردد، نیازمندیهای محرک بیس از نیازمندیهای محرک گیت تریستور مهم‌تر و پر هزینه‌تراست.

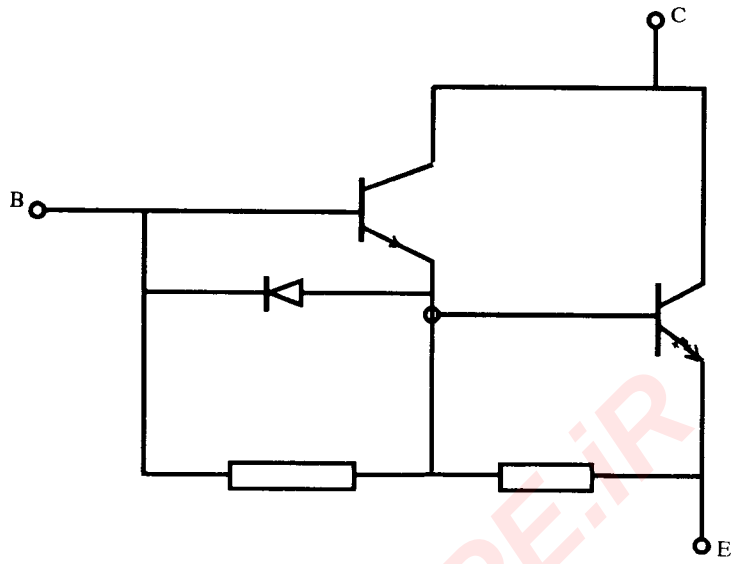
بعنوان مثال، یک تریستور ۳۰ A برای روشن شدن به پالس ۰/۱ A نیاز دارد، حال آنکه یک ترانزیستور ۳۰ A در خلال پریود روشن، بطور مداوم به جریان بیس ۲ A نیاز دارد.

توجه: مقیاس محورها لگاریتمی است.



شکل ۲-۳۴ منطقه کار مطمئن ترانزیستور

1- Safe operating area 2- Switching time



شکل ۲-۳۵ آرایش دارلینگتون ترانزیستور قدرت

البته در بعضی ترانزیستورها مدار تحریک بیس در همان چیپ ترانزیستور قدرت اصلی جا داده شده است. اگر چنانچه جریان محرک بیس ترانزیستور قدرت از ترانزیستور دیگری مطابق شکل ۲-۳۵ که به آرایش دارلینگتون[1] موسوم است، تأمین گردد، ضریب تقویت (بهره) ترانزیستور بطور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد و نیاز به کاربرد مدار محرک بیس خارجی برطرف می‌شود لیکن زمان سوئیچینگ طولانی‌تر می‌شود.

۲-۹ MOSFET قدرت[2]

MOSFET قدرت وسیله نیمه هادی است که از ترانزیستور اثر میدان (FET)[3] مشتق گردیده است و به عنوان یک سوئیچ سریع بکار برده می‌شود. تقاضای روزافزون برای عملکرد وسایل نیمه‌هادی قدرت در فرکانسهای بالا، منجر به توسعه MOSFET قدرت گردیده است.

همانطوریکه میدانیم ترانزیستور دوقطبی (BJT)[4] وسیله‌ای است که با جریان کنترل می‌شود یعنی جریان خروجی I_C توسط جریان ورودی I_B کنترل می‌شود و بنابراین جریان کلکتور

1- Darlington arrangement

2- Power metal oxide semiconductor FET

3- Field effect transistor

4- Bipolar junction transistor

WWW.iEPE.iR

(جریان خروجی) به جریان بیس (جریان ورودی) وابسته است. بنابراین با اعمال جریان بیس می‌توان ترانزیستور را در حالت وصل (هدایت) نگاه داشت و چون همواره بایستی مقداری جریان از بیس عبور کند امپدانس ورودی آن نسبتاً کم است. در حالیکه ترانزیستور اثر میدان (FET) وسیله‌ای است که با ولتاژ کنترل می‌شود یعنی جریان خروجی آن توسط ولتاژ ورودی کنترل می‌شود، بنابراین جریان ورودی آن ناچیز و در نتیجه امپدانس ورودی آن خیلی زیاد است.

این‌نیازمندی جریان تحریک کم موجب می‌شود که بتوان MOSFET قدرت را (که‌نوعی ترانزیستور FET است) مستقیماً توسط خروجی مدارهای منطقی، خروجی مدارهای LSI[1] و پورتهای میکروکامپیوتر[2] تحریک کرد. از آنجائیکه MOSFET وسیله‌ای است که عملکرد آن به عبور حاملهای اکثریت وابسته است یعنی اینکه یک وسیله تک حاملی است (بر خلاف BJT که وسیله دو حاملی وابسته به حاملهای اقلیت است)، در آن تأخیر مربوط به ذخیره حاملهای بار اقلیت وجود ندارد، بنابراین عمل سوئیچینگ (کلیدزنی) آن فوق‌العاده سریع بوده، زمان قطع و وصل می‌تواند خیلی کمتر از یک میکروثانیه باشد. MOSFET های قدرت در مبدلهای (کنورترهای) قدرت پائین - فرکانس بالا کاربرد روزافزون دارند. همچنین در این وسایل پدیده شکست ثانوی رخ نمی‌دهد.

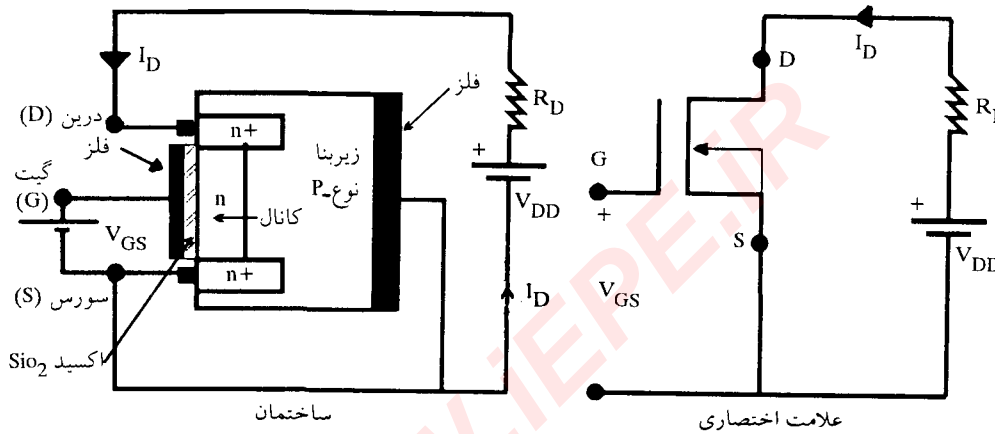
دو نوع ترانزیستور اثر میدان وجود دارد، یکی ترانزیستور اثر میدان پیوندی (JFET)[3] و دیگری ترانزیستور اثر میدان اکسید فلز نیمه‌هادی (MOSFET) است که نوع اخیر همچنین ترانزیستور اثر میدان باگیت عایق شده (IGFET)[4] نیز نامیده می‌شودو هر یک دارای مزایای مربوط به خود می‌باشند.

MOSFET ها خود بر دو نوع هستند: (۱) MOSFET نوع تهی[5] (۲) MOSFET نوع افزایشی[6] (برخلاف JFETها که همگی از نوع تهی هستند). شکل ۲-۳۶ الف مقطع یک MOSFET نوع تهی کانال n را نشان می‌دهد. همانطوریکه ملاحظه می‌شود کانال n بر روی زیربنای نوع P[7] بنا نهاده شده است و ترمینالهای اصلی آن موسوم به درین[8] و سورس[9] از ماده نوع n با ناخالصی زیاد (n^+) تشکیل شده است تا اتصالات با مقاومت کم را فراهم نمایند. ترمینال سوم آن، یعنی گیت به وسیله لایه نازک اکسید سیلیکون (SiO_2) از کانال عایق شده است. به همین دلیل امپدانس ورودی MOSFETها از JFETها بیشتر است. معمولاً زیربنا به

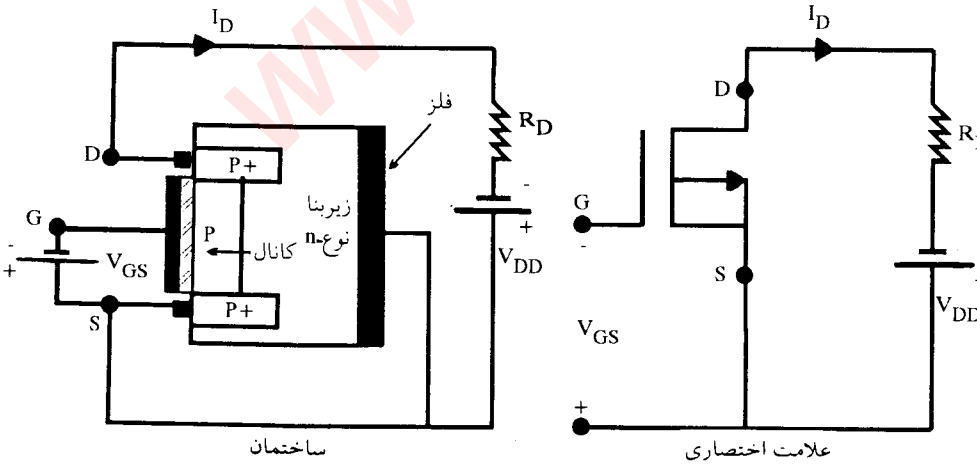
1- Large scale integrated circuit
2- Microcomputer ports
3- Junction FET
4- Insulated gate FET
5- Depletion type
6- Enhancement type
7- P - type substrate
8- Drain
9- Source

WWW.IEPE.IR

سورس متصل است. ولتاژ گیت - سورس V_{GS}، می‌تواند مثبت یا منفی باشد. اگر V_{GS} منفی باشد دراثر میدان حاصل بخشی از الکترونهای کانال n از گیت دور شده (رانده می‌شوند) و در نتیجه یک ناحیه تهی یا تخلیه از حاملهای اکثریت در زیر لایه اکسید فلزی بوجود می‌آید و عرض موثر کانال کاهش و مقاومت درین به سورس (R_{DS}) افزایش می‌یابد. اگر چنانچه به اندازه کافی ولتاژ گیت منفی اعمال گردد، کانال کاملاً از حاملهای بار تهی شده و مقدار R_{DS}



(الف) MOSFET نوع تهی کانال n



(ب) MOSFET نوع تهی کانال P

شکل ۲-۳۶ MOSFETهای نوع تهی

WWW.IEPE.IR

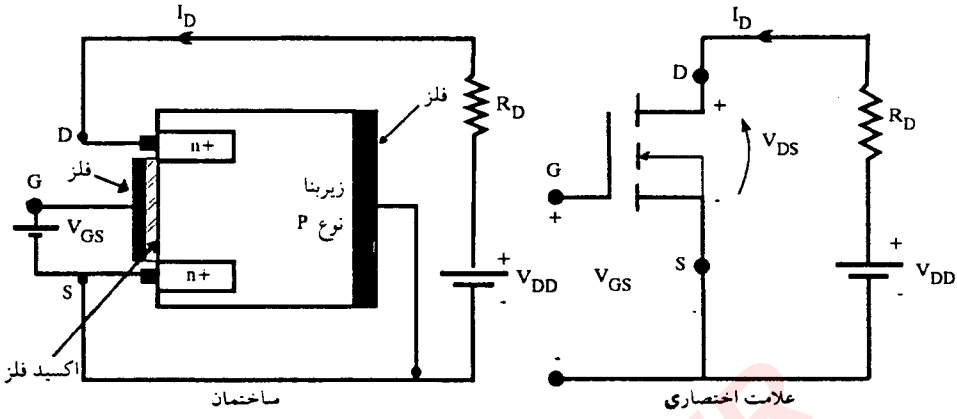
افزایش یافته و در نتیجه جریان درین به سورس به صفر تنزل می‌یابد ($I_{DS}=0$). با اعمال ولتاژ مثبت V_{GS}، کانال عریض‌تر شده و در اثر کاهش R_{DS}، جریان I_{DS} افزایش می‌یابد. در MOSFET نوع تهی کانال P، پلاریته V_{DS}، I_{DS} و V_{GS} معکوس می‌گردد (شکل ۲-۳۶ ب).

MOSFET نوع افزایشی کانال n و کانال P به ترتیب در اشکال ۲-۳۷ الف و ب نشان داده شده است. در حقیقت تفاوت آن با نوع تهی در این است که هیچ نوع کانالی وجود ندارد. همانطوریکه در شکل ۲-۳۷ الف مشاهده می‌شود با اعمال V_{GS} مثبت، ولتاژ القاء شده الکترونها را از زیربنای نوع P جذب و آنها را در سطح تحتانی لایه اکسید SiO_2 انباشته می‌کند. اگر چنانچه V_{GS} از مقداری که به ولتاژ آستانه[1] (V_T) معروف است، بیشتر باشد، تعداد کافی الکترون انباشته شده و یک کانال مجازی تشکیل شده و جریان از درین به سورس جاری می‌گردد. بنابراین مثبت بودن ولتاژ گیت (بیش از ولتاژ آستانه) یک کانال سطحی را برای عبور جریان فراهم می‌کند و مقدار ولتاژ گیت تعیین کننده عمق کانال و در نتیجه مقدار جریان عبوری خواهد بود.

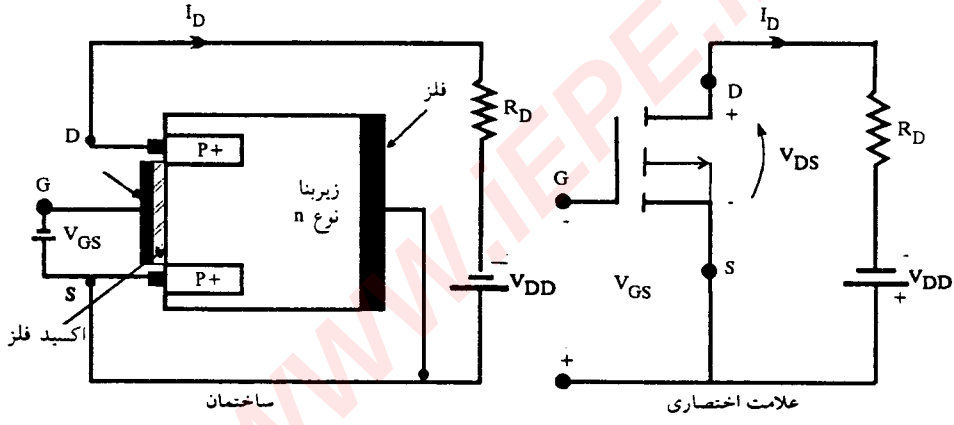
مشخصه MOSFET افزایشی در شکل ۲-۳۸ نشان داده شده است. به ازاء مقادیر ولتاژ درین - سورس کم، وسیله دارای مشخصه مقاومت - ثابت است، لیکن در مقادیر بالاتر، مقدار جریان توسط ولتاژ گیت معین می‌گردد. البته در کاربردهای عملی برای به حداقل رساندن تلفات حالت روشن (وصل) بایستی ولتاژ درین - سورس کوچک باشد. بنابراین ولتاژ گیت در مقدار بالایی تنظیم می‌شود طوریکه اطمینان حاصل شود که حد جریان درین بالاتر از مقدار جریان باراست و در نتیجه وسیله در شرایط مقاومت - ثابت کار می‌کند. بایستی ولتاژ گیت در حداکثر مقدار ۲۰V محدود گردد. همانطوریکه مشخصه نشان می‌دهدوقتی که ولتاژ گیت - سورس به اندازه کافی بزرگ است، وسیله کاملاً هدایت می‌کند و نقش کلید بسته را دارد و هنگامی که ولتاژ گیت - سورس کمتر از ولتاژ آستانه است وسیله خاموش می‌شود و نقش کلید باز را دارد. برای اینکه وسیله همواره در حالت وصل (هدایت) باشد، اعمال پیوسته ولتاژ گیت - سورس ضروری است. به استثنای پریود انتقال از حالت وصل به حالت قطع (یا برعکس) که در خلال آن خازن گیت شارژ یا دشارژ می‌گردد، در مواقع دیگر از گیت جریانی عبور نمی‌کند. مقاومت حالت روشن (وصل) MOSFET تابعی از مقدار ولتاژ شکست است و مقدار آن با افزایش این ولتاژ و افزایش درجه حرارت به سرعت افزایش می‌یابد. بطور نمونه مقدار آن برای وسیله با ولتاژ شکست ۱۰۰V، برابر ۰/۱Ω و برای وسیله با ولتاژ شکست ۵۰۰V برابر ۰/۵Ω است. در ولتاژهای بالاتراز ۱۰۰V تلفات هدایت آن از ترانزیستور دو قطبی و تریستور بیشتر است، اما تلفات سوئیچینگ آن بمراتب کمتر است. از اینرو این وسایل در ولتاژهای نامی کوچک موجود

1- Threshold voltage

www.iEPE.ir

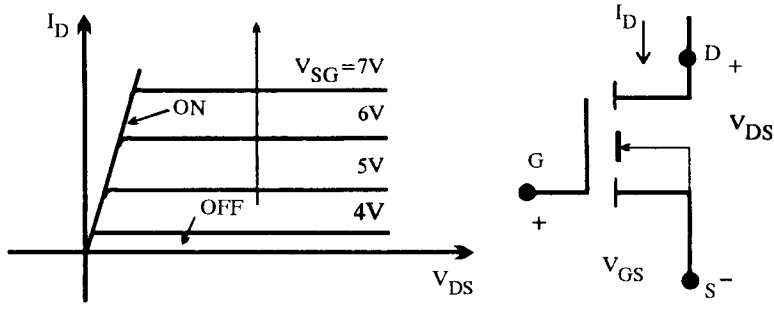


(الف) MOSFET نوع افزایشی کانال n



(ب) MOSFET نوع افزایشی کانال P

شکل ۲-۳۷ MOSFETهای نوع افزایشی



شکل ۲-۳۸ مشخصه V-I MOSFET

WWW.IEPE.IR

هستند که منجر به مقاومت هدایت کم و در نتیجه تلفات هدایت کم می‌گردند. البته MOSFETهای با ولتاژ نامی بالاتر از ۱۰۰۰V موجود هستند لیکن مقدار نامی جریان آنها کوچک است و یا با مقدار نامی ۱۰۰A موجودندلیکن مقدار نامی ولتاژ آنها کوچک است.

MOSFETها را می‌توان به سهولت با یکدیگر موازی کرد، زیرا مقاومت حالت روشن (وصل) آنها دارای ضریب حرارتی مثبت است. بنابراین وقتی یکی از MOSFETها درابتدا جریان زیادتری را از خود عبور می‌دهد سریعتر درجه حرارت آن افزایش یافته در نتیجه مقاومت حالت وصل آن زیاد می‌شود و سبب می‌شود که جریان آن به طور عادلانه بین سایر MOSFETها تقسیم گردد.

۲-۱۰ IGBT[1]

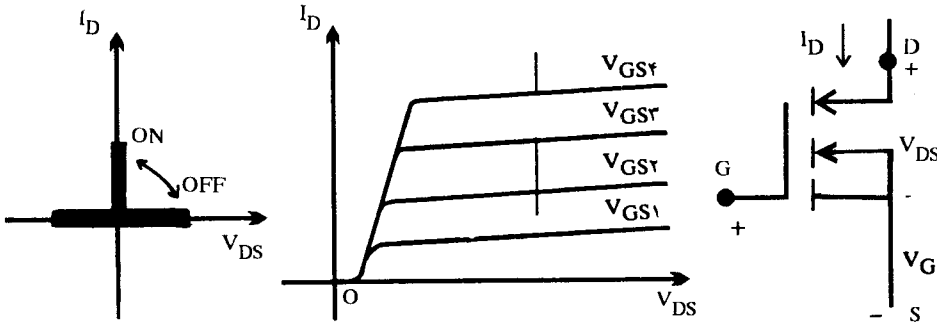
BJTها و MOSFETها دارای خصوصیاتی هستند که از نقطه نظرهایی یکدیگر را تکمیل می‌نمایند. BJTها در حالت روشن(وصل) دارای تلفات هدایت کمتری هستند، در حالیکه زمان سوئیچینگ آنها بخصوص در خاموش شدن طولانی‌تراست. MOSFETها قادرند که بمراتب سریعتر قطع و وصل گردند لیکن تلفات هدایت آنها بیشتر است. این نکات موجب گردید که تلاش در زمینه ترکیب این دو وسیله در قالب یک وسیله جدید آغازگردد. وسیله جدید می‌تواند از مزایای BJTها و MOSFETها برخوردار باشد.

تلاشها سرانجام منجر به توسعه وسیله جدیدی موسوم به ترانزیستور دو قطبی با گیت عایق شده (IGBT) گردید، این وسیله کاربرد فراوانی دارد. اسامی دیگری که به این وسیله اطلاق می‌گردد عبارتند از: GEMFET، COMFET، IGT، MOSFET حالت دوقطبی.

علامت‌اختصاری IGBT درشکل ۲-۳۹الف‌ومشخصه‌های I-V آن‌درشکل ۲-۳۹ب نشان داده شده است. پاره‌ای از مزیت‌های MOSFET، BJT و GTO در این وسیله جمع شده است.مشابه MOSFETها، دارای امپدانس گیت بزرگی است و بنابرانی با انرژی کمی به حالت وصل سوئیچ می‌گردد. نظیر BJTها، دارای ولتاژ حالت روشن (وصل) کوچکی است (حتی وقتی که مقدار نامی ولتاژ مسدود زیاد است)، به عنوان مثال در وسیله با مقدار نامی ۱۰۰۰V، ولتاژ حالت وصل (V_{on}) در حدود ۲ الی ۳ ولت است. IGBT را همچنین می‌توان طوری طراحی کرد که بتواند همانند GTO ولتاژهای منفی را نیز مسدود نماید. مشخصه سوئیچینگ ایده‌ال آن در شکل ۲-۳۹ پ نشان داده شده است.زمان قطع و وصل IGBT در حدود ۱ میکرو ثانیه است و مقادیر نامی آنها می‌تواند تا ۱۲۰۰V و ۱۰۰A باشد.

1- Insaluted gate bipolar transistor

WWW.IEPE.IR

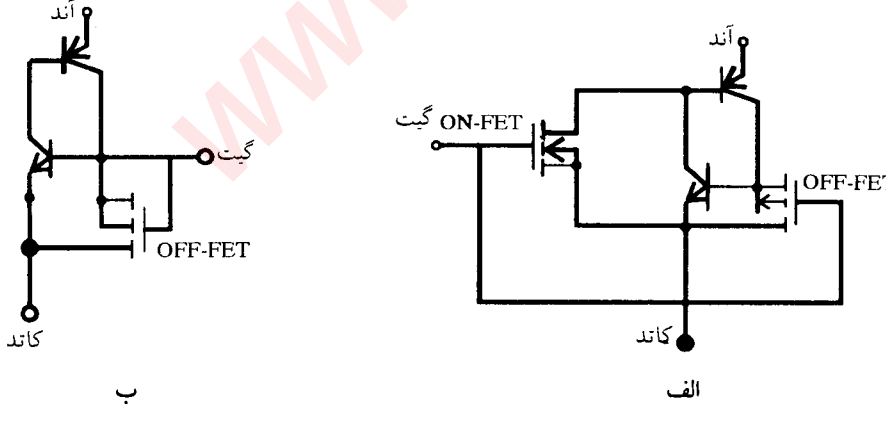


(پ) مشخصه ایده‌ال (ب) مشخصه‌های V-I (الف) علامت اختصاری

شکل ۲-۳۹ علامت اختصاری و مشخصه IGBT

۲-۱۱ تریستورهای قابل کنترل با MOS

تریستور قابل کنترل با MOS یا MCT[1]، وسیله جدیدی است که درمراحل اولیه توسعه و پیشرفت قراردارد. این وسیله اساساً یک تریستور است که یک یا چند MOSFET در ساختمان گیت آن تعبیه شده است. دو نوع مدار معادل آن در شکل ۲-۴۰ الف و ب نشان داده شده است. در شکل ۲-۴۰ الف، MCT بوسیله MOSFET روشن و خاموش (قطع و وصل)



ب الف

شکل ۲-۴۰ مدار معادل MCT

1- MOS - Controlled thyristor

WWW.IEEE.IR

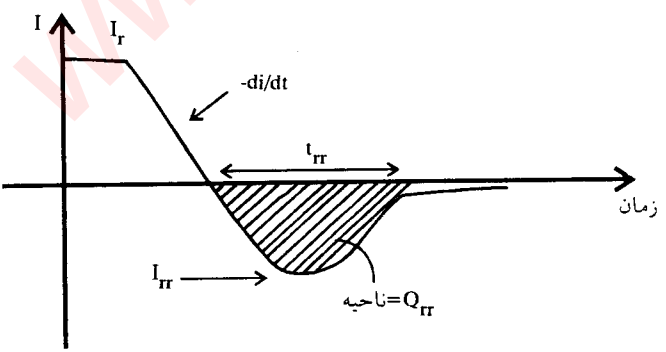
می‌گردد. در شکل ۲-۴۰ ب، MCT مشابه یک تریستور معمولی بوسیله جریان گیت روشن (وصل) و بوسیله MOSFET تعبیه شده، خاموش (قطع) می‌گردد. هر دو نوع MCT کاربردهایی مشابه GTO دارند لیکن MCTها به تجهیزات آتش کردن گیت ساده‌تری، بخصوص به سیگنالهای گیت با اندازه کمتری، نیاز دارند.

۲-۱۲ مقادیر نامی (ظرفیت)[1]

در بخش‌های قبل مشخصه‌های وسایل یکسو کننده مختلف به اختصار مورد بحث قرار گرفت، لیکن در عمل بایستی جنبه‌های متعدد دیگری نیز مورد توجه قرار گیرد و تمامی اینها در مشخص کردن مقادیر نامی مشارکت دارند.

فرایندخاموش‌کردن تریستورقبلاًدرارتباط با شکل ۲-۱۸ توصیف گردید و با مراجعه‌به شکل ۲-۴۱ مقادیر نامی مربوطه تعیین می‌گردند. دیود بایاس مستقیم و یا تریستوری با جریان I_r را در نظر بگیرید که با تغییرات di/dt معینی خاموش می‌شود، جریان در جهت معکوس عبور می‌کند تا وقتی که بار ذخیره Q_{rr} بازیابی شود. یک وسیله بخصوص، در مقادیر معین I_r و di/dt دارای مقادیر نامی بازیابی معکوس Q_{rr}، زمان بازیابی معکوس T_{rr} و جریان بازیابی معکوس I_{rr} می‌باشد.

نحوه معمول روشن کردن تریستور به کمک جریان گیت قبلاً توصیف شده است، لیکن می‌توان تریستور را به کمک نرخ ازدیاد ولتاژ مستقیم،[2] روشن کرد. با در نظر گرفتن اینکه پیوند



شکل ۲-۴۱ شرایط خاموش شدن (قطع)

1- Rating

2- Rate of rise of forward voltage

تریستور در حالت قطع (خاموش) بصورت یک خازن عمل می‌کند، یک جریان جابجایی $i=cdv/dt$ (جریان بارگیری یا شارژ خازن) وجود خواهد داشت. برای یک نرخ ازدیاد ولتاژ بالا، مثلاً $100V/\mu s$ ، حاملهای اقلیت در طول پیوند شتاب گرفته و با سرعتی که دارند، حتی غیاب جریان گیت، تریستور را در وضعیت روشن قرار می‌دهند. بنابراین تریستور یک مقدار نامی حداکثر dv/dt دارد که نبایستی از این مقدار تجاوز گردد.

وقتی که تریستور به شیوه معمول روشن می‌شود، پیوند تریستور ابتدا در ناحیه الکترود گیت شکسته می‌شود. اگر جریان آند بلافاصله برقرار شود، چگالی جریان در این ناحیه زیاد خواهد بود طوریکه بواسطه اضافه حرارت[1] ایجاد شده، خسارت بر آن وارد می‌شود. بنابراین بایستی آهنگ (میزان) ازدیاد جریان محدود گردد به زمانی که طول می‌کشد تا شکست پیوند بطور کامل در پیوند گسترش یابد. این زمان بطور نمونه $10\mu S$ است. تریستور یک مقدار نامی حداکثر $(di/dt)_{max}$ خواهد داشت که نبایستی از این مقدار تجاوز گردد.

درجه حرارت پیوند[2] در دیود نبایستی از مقدار نامی $150°C$ و در تریستور از $125°C$ و در ترانزیستور قدرت از $150°C$ تا $200°C$ تجاوز نماید. مقاومت حرارتی پیوند نسبت به پایه یا تکیه‌گاه در مقادیر نامی ذکر می‌شود.

تلفات وسیله تقریباً تابعی از مجذور جریان است، بنابراین برای اکثرشکل موج‌ها می‌توان از مقادیر موثر در تعیین مقادیر نامی استفاده کرد. جریان نامی جریانی است که در شرایط ماندگار منجر به درجه حرارت نامی در محل پیوند گردد، البته وقتی که پایه (عنصر خنک کننده یا گرماگیر) در درجه حرارت تعیین شده خود قرار داشته باشد. وقتی که وسیله یک جریان دوره‌ای[3] با فرکانس تکرار $50Hz$ یا $60Hz$ را حمل می‌کند، تغییر درجه حرارت در هر سیکل برای مقدار جریان موثر بکار رفته به اندازه کافی کوچک است. گاهی مقدار میانگین شکل موج بخصوصی، نظیر سینوسی نیم موج در فاصله هدایت $180°$ به عنوان مقدار نامی وسیله در نظر گرفته می‌شود.

در تحت شرایط اضافه بار زیادِ کوتاه مدت، بخش اعظم حرارت ایجاد شده در توده حرارتی سیلیکون[4] ذخیره شده و باعث افزایش حرارت آن گردیده و مقدار کمی از آن به خارج انتشار می‌یابد. با فرض اینکه تلفات توان وسیله متناسب با مجذور جریان i است، آنگاه مجموع مقادیر i^2 در فاصله زمانی t یعنی $\int i^2 dt$ را می‌توان به افزایش درجه حرارت ارتباط داد. بنابراین وسیله یک مقدار نامی $\int i^2 dt$ دارد که به افزایش مجاز درجه حرارت بیش از حداکثر درجه

1- Overheating 2- Junction temperature 3- Cyclic current

4- Thermal mass

حرارت ماندگار آن مربوط می‌شود. فرض بر این است که شرایط اضافه بار وقتی رخ می‌دهد که وسیله قبلاً در یک پریود طولانی جریان مجاز نامی را از خود عبور می‌داده و درجه حرارت پیوند در مقدار نامی‌اش بوده است.

مشخصه دیود، تریستور، تریاک و ترانزیستور قدرت که قبلاً نشان داده شده است، در تمامی آنها ولتاژ شکستی وجود دارد که اعمال ولتاژ بیش از آن وسیله را از وضعیت خاموش به وضعیت روشن سوئیچ نموده و اغلب منجر به خرابی آن می‌گردد. هر وسیله دارای مقادیر ولتاژ نامی پیوسته و تکراری[1] است که در جهت معکوس بدون شکست آنرا تحمل می‌نماید. تریستور در گرایش مستقیم نیز دارای مقادیر نامی مشابهی است. این ولتاژها به پیک ولتاژ معکوس تکراری[2] و پیک ولتاژ مستقیم تکراری[3] موسوم می‌باشند. در عمل، همچنین گاهی ولتاژهای گذرا نیز در مدار ظاهر می‌شوند، تریستور (وسایر وسایل) برای چنین ولتاژهای گذار و غیرتکراری[4] دارای مقادیر نامی است که بدون شکست آنرا تحمل می‌نماید.

یک وسیله بخصوص در وضعیت روشن دارای افت ولت مستقیمی است که مقدار آن به ازاء جریان معین بیان می‌شود.

در مقادیر نامی ترانزیستور علاوه بر موارد فوق بایستی ضریب بهره جریان کلکتور به بیس و ملاحظات فرکانس و زمان سوئیچینگ را نیز در نظر گرفت.

همانطوریکه قبلاً بیان شد مقادیر نامی گیت تریستور با توجه به مقادیر ماکزیمم ولتاژ و جریان مجاز، تعین می‌گردند. بعلاوه یک تریستور دارای مقادیر نامی پیک و میانگین توان گیت است که نبایستی از این مقادیر تجاوز گردد. جریان قفلی (تثبیت کننده) و جریان نگهدارنده که قبلاً توضیح داده شد حداکثر مقادیری هستند که در مقادیر نامی تریستور بخصوص ذکر می‌شوند.

۲-۱۳ خنک سازی

منابع تلفات در وسایل نیمه هادی را می‌توان به شرح زیر طبقه‌بندی کرد:

۱- تلفات وسیله در خلال هدایت مستقیم وسیله، که تابعی از افت ولت مستقیم[5] و جریان هدایت است. این منبع اصلی تلفات در شبکه تغذیه شهری و در فرکانس پائین است.

۲- تلفات در خلال مسدود بودن وسیله، که به جریان نشتی مربوط می‌شود.

۳- تلفات در مدار گیت که از انرژی ورودی سیگنال آتش به مدار گیت ناشی می‌شود. در عمل

1- Continuous and repetitive volage
2- Repetitive peak reverse volage
3- Repetitive peak forward volage
4- Non-repetitive
5- Forward volt-drop

WWW.IEPE.IR

وقتی از پالس آتش‌کننده استفاده می‌شود، این تلفات ناچیز است.
۴- تلفات سوئیچینگ (کلیدزنی)، یعنی انرژی که در خلال قطع و وصل (روشن وخاموش شدن) در وسیله تلف می‌شود. وقتی که عمل سوئیچینگ در فرکانسهای بالا نظیر ۱kHz انجام می‌گیرد، این اتلاف انرژی قابل ملاحظه خواهد بود.

تلفات منجر به تولید حرارت در درون وسیله می‌شود که بایستی به خارج انتقال یابد، چه در غیر این صورت درجه حرارت ناحیه پیوند افزایش می‌یابد. مادامی‌که آهنگ انتشار حرارت به محیط خارج با آهنگ تلفات هماهنگ نشده است، درجه حرارت وسیله افزایش می‌یابد. جهت انجام این هماهنگی لازم است مسیری جهت انتقال (انتشار) حرارت از وسیله به خارج فراهم گرددتا اینکه درجه حرارت پیوند از حد مجاز تجاوز نکند. چنین مسیر انتقال حرارتی شامل تکیه‌گاه (پایه)[1] - خنک کننده (گرماگیر)[2] - محیط خارج[3] می‌باشد. بنابراین حرارتی که در ناحیه پیوند تولید می‌شود به تکیه‌گاه (پایه) واز آنجا به خنک کننده (گرماگیر) واز آنجابه محیط خارج انتقال می‌یابد. در حقیقت گرمای تولید شده در وسیله از طریق پایه (تکیه‌گاه) آن بصورت تشعشع انتشار می‌یابد و درجه حرارت پایه می‌تواند تا سطح مجازی افزایش یابد. جهت انتشار بیشتر حرارت تولید شده لازم است از سیستم خنک‌کننده (گرماگیر) استفاده گردد. در شکل ۲-۴۲ الف یک خنک کننده فلزی پره‌ای[4] (رادیاتور) نشان داده شده است که در آن قسمت اعظم حرارت بصورت جابجایی[5] به هوا انتقال می‌یابد. در جائیکه از نظر اندازه پره‌ها محدودیت وجود دارد و یا انتشار حرارتی در سطح بالایی است، گرماگیر می‌تواند مطابق شکل ۲-۴۲ب بوسیله آب خنک شود.

انتقال حرارت از ناحیه با درجه حرارت بالاتر به ناحیه با درجه حرارت پائین‌تر صورت می‌گیرد.این انتقال با اختلاف درجه حرارت متناسب است و نسبت آنها به مقاومت حرارتی R موسوم است.

$$P = \frac{T_1 - T_2}{R} \qquad (۱-۲)$$

که در آن T_1 و T_2 به ترتیب درجه حرارت جسم گرم و جسم سرد است. واحد توان وات، واحد درجه حرارت °C و مقاومت حرارتی °C/W است.

همانطوریکه گفته شد مسیر انتقال حرارت از ناحیه پیوند به پایه و از آنجا به خنک کننده

1- Base
2- Heat sink
3- Ambient
4- Metal-finned
5- Convection

www.IEPE.ir

و از آنجا به محیط اطراف است و مقاومت حرارتی کل از جمع مقاومتهای حرارتی هر بخش بدست می‌آید. مقاومت حرارتی کل (از پیوند تا محیط اطراف) برابر است با

$$R_{ja} = R_{jb} + R_{bh} + R_{ha} \qquad (۲-۲)$$

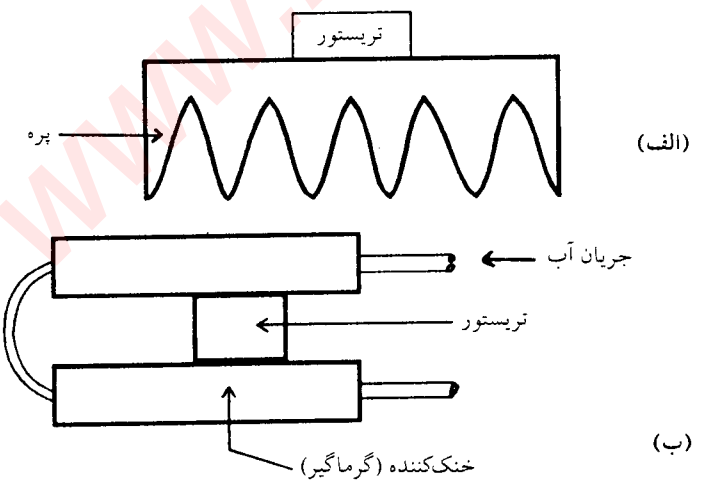
که درآن R_{jb}، R_{bh} و R_{ha} به ترتیب مقاومت حرارتی پیوند - پایه، پایه - خنک‌کننده و خنک‌کننده - محیط اطراف است.

درجه حرارت پیوند مجازی[1] Tvj برابر است.

$$T_{vj}=T_a+PR_{ja} \qquad (۳-۲)$$

که درآن T_a درجه حرارت محیط است. شکل ۳-۴۳ مدار معادل انتقال حرارت را نشان می‌دهد که می‌توان درجه حرارت پایه و خنک کننده را تعیین کرد. توضیح اینکه کلمه **پیوند مجازی** به این دلیل بکار رفته است تا از تعریف دقیق پیوند در وسیله چند لایه‌ای[2] خودداری شود.

تمامی محاسبات فوق برای شرایط ماندگار و جریان پیوسته[3] انجام گرفته است، یعنی موقعی که تلفات ثابت و درجه حرارت در مقدار پایدار استقرار پیدا کرده است. حال آنکه به علت پائین بودن ظرفیت ذخیره حرارتی[4] وسایل نیمه‌هادی، در خلال پریود تغییرات دوره‌ای[5]

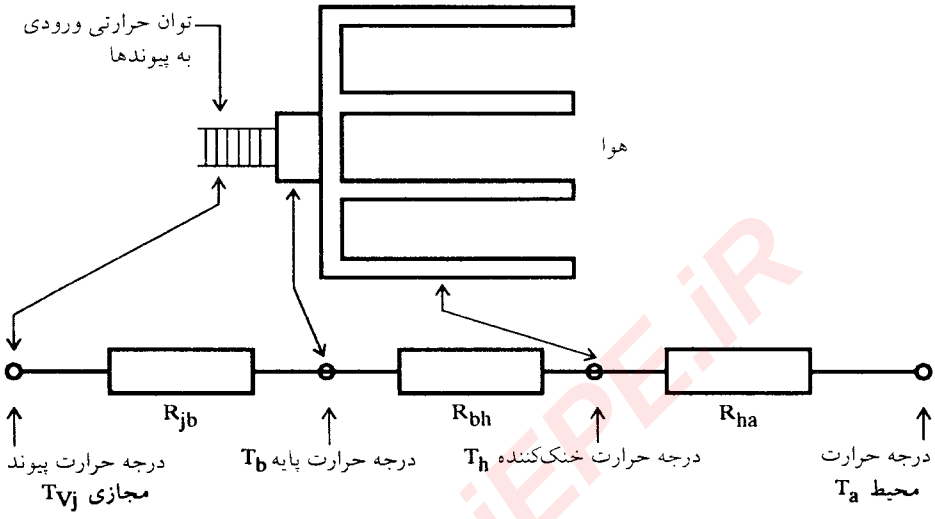


شکل ۲-۴۲ نحوه خنک‌سازی (الف) بوسیله هوا (ب) بوسیله آب

1- Virtual junction
2. Multi-layer device
3. Continous current
4. Thermal storage capacity
5. Cyclic change

WWW.IEEE.IR

تغییردرجه حرارت رخ می‌دهد. در شرایط ماندگار و فرکانس ۵۰ Hz، مقاومت‌های حرارتی که در تلفات توان متوسط نامی بیان شده‌اند، مقادیرشان طوری است که اطمینان می‌دهند که در خلال پریود دوره‌ای، درجه حرارت از حداکثر مجاز تجاوز نمی‌کند.



شکل ۲-۴۳ پخش گرما و توزیع درجه حرارت

در خلال گذرای کوتاه مدت (گذرای با پریود کوتاه)[1]، نظیر شرایط اضافه‌بار یا خطا(اتصال کوتاه)[2]، بایستی افزایش درجه حرارت پیوند با در نظر گرفتن ظرفیت ذخیره حرارتی وسیله، محاسبه گردد. شرایط حرارتی به گونه‌ای است که بخشی از حرارت تولید شده در توده حرارتی ذخیره گردیده و باعث افزایش درجه حرارت آن می‌شود و بخش باقیمانده به خنک‌کننده انتقال می‌یابد. اگر درجه حرارت ناحیه پیوند θ بالاتراز درجه حرارت محیط باشد و در فاصله زمانی کوتاه δt، افزایش درجه حرارت $\delta\theta$ داشته باشیم، تعادل انرژی به قرار زیر است.

انرژی‌انتقال یافته به خنک‌کننده (محیط) + افزایش انرژی حرارتی ذخیره شده = انرژی مربوط به تلفات

$$P\delta t = A\delta\theta + B\theta\delta t$$

که درآن $P=$ تلفات توان در وسیله

1- Short-period transient 2- Fault

www.iEPE.iR

ظرفیت ذخیره حرارتی برحسب ژول انرژی ذخیره شده به‌ازاء یک درجه سانتی‌گراد افزایش درجه حرارت $A=$

توان انتقال یافته به محیط به ازای یک درجه سانتی‌گراد افزایش درجه حرارت $B=$

تفاوت درجه حرارت پیوند و درجه حرارت محیط $\theta=$

و در حد داریم

$$P = A(d\theta/dt) + B\theta$$

با فرض اینکه در زمان $t=0$، θ برابر صفر است، حل معادله فوق معادله شناخته شده نمایی زیراست:

$$\theta = \theta_{max} (1 - e^{-t/T}) \qquad (۴-۲)$$

که درآن :

$$\theta_{max} = P/B = \text{افزایش درجه حرارت نهایی دائمی} \qquad (۵-۲)$$

$$T = A/B = \text{ثابت زمانی حرارتی} \qquad (۶-۲)$$

تابع صعودی نمایی (۲-۴) برای ماده همگن، نظیر هادی مسی که حرارت به سرعت درآن انتشار می‌یابد، مناسب است، اما در بکار بردن آن برای افزایش درجه حرارت پیوند، بایستی دقت لازم را مبذول داشت. تلفات توان در تریستور، در ناحیه اتصال بطور یکنواخت رخ می‌دهد، هر چه گذرای اضافه‌بار بیشتر باشد، توده (جرم) در معرض افزایش درجه حرارت کمتر خواهد بود، از این‌رو نمی‌توان یک مقدار واحدی را به ظرفیت ذخیره حرارتی آن نسبت داد. سیلیکون هادی حرارتی خوبی نیست، بنابراین انتشار حرارت تولید شده در خلال گذرای کوتاه‌مدت (در مقایسه باگذرای بلندمدت و مقدار کمتر) بسیار کم است.

برای نشان دادن شرایط اضافه‌باربه کمک معادله (۲-۴)، ملاحظه می‌شود که مقدار نهایی حداکثر افزایش دما، θ_{max} بزرگتر خواهد شد زیرا مقدار P در معادله (۲-۵) بزرگتر است. در شکل ۲-۴۴ افزایش درجه حرارت از شرایط سرد اولیه نشان داده شده است، که درآن θ_{max1} برای افزایش نامی و θ_{max2} برای شرایط اضافه بار است. در عمل، درجه حرارت پیوند نبایستی از θ_{max1} تجاوز نماید، چه در غیراینصورت وسیله خراب می‌شود. بنابراین شرایط اضافه بار را تا زمان t_1 تحمل می‌نماید که درآن درجه حرارت پیوند به حداکثر مقدار خود می‌رسد. البته θ_{max2} تنها یک مقدار ریاضی است که منحنی اضافه‌بار را تعریف می‌کند و این مقدار در عمل قابل حصول نیست.

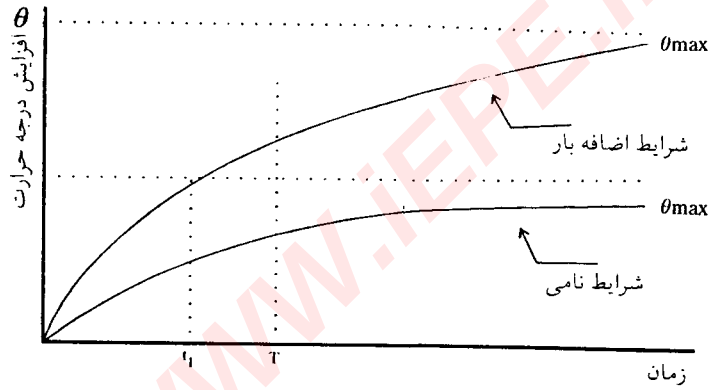
از آن‌جایی‌که شرایط درون وسیله، درخلال‌اضافه‌باربسیار پیچیده است، برای شرایط قبل

WWW.IEPE.IR

بجای معادله نمایی ساده (۲-۴)، از مفهوم امپدانس حرارتی گذرا[1] استفاده می‌شود. امپدانس حرارتی گذرا Z_{th} برای یک زمان معین به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$Z_{th} = \frac{\text{اختلاف درجه حرارت (افزایش)}}{\text{تلفات توان در طول زمان معین}} \qquad (۲-۷)$$

در داده‌های کارخانه سازنده[2] برای یک وسیله معین و اضافه بار کوتاه مدت، مقدار امپدانس حرارتی گذرا ذکر شده است که می‌توان از آن در معادله (۲-۷) استفاده کرد. بنابراین در این صورت محاسبه شرایط اضافه بار به سادگی محاسبه شرایط نامی ماندگار (یعنی معادله ۲-۱) خواهد بود. از امپدانس حرارتی گذرا برای کاربردهایی که در آنها با اتلاف توان تکراری زیاد[3] مواجه هستیم، استفاده می‌شود.



شکل ۲-۴۴ افزایش درجه حرارت پیوند در خلال اضافه بار

۲-۱۴ مقایسه وسایل نیمه هادی قدرت

وسایل نیمه‌هادی قدرت در تجهیزات الکترونیک قدرت به عنوان یک سوئیچ باز یا بسته بکار می‌روند. یک سوئیچ ایده‌ال دارای خواص زیراست:

- مقادیر نامی یا ظرفیت ولتاژ و جریان نامحدود است.
- زمانهای قطع و وصل آنی است.

1- Transient thermal impedance

2- Manufacturer's data

3- Repetitive high-power dissipation

WWW.IEPE.IR

- جریان نشتی صفر است.
- تلفات هدایت و سوئیچینگ صفر است.
- توان مربوط به آتش کردن کیت صفر است.
- توانایی تحمل جریانهای اضافه بار و ولتاژهای گذرا را دارد.
- حفاظت آن در مقابل آتش شدن ناخواسته و شرایط اتصال کوتاه آسان است.
- هزینه آن کم و نصب و مونتاژ آن آسان است.

در عمل وسایل نسبت به هم دارای مزایایی هستند که هریک را برای یک کاربرد معین مناسب می‌نماید. گاهی در انتخاب یک وسیله تداخل وجود دارد و نمی‌توان به صراحت یکی را برگزید. معیار مهم در کاربردهای متفاوت اغلب به مقادیر نامی (ظرفیت)، تلفات هدایت، تلفات سوئیچینگ، زمان سوئیچینگ، شیوه کنترل و در نهایت به هزینه بستگی دارد.

تریستور معمولی دارای ظرفیت بالاست، مقاوم است، تلفات هدایت آن کم و ارزان قیمت است لیکن روشن شدن آن کند است و تنها با قطع جریان بار قابل خاموش شدن است. برای کاربردهایی نظیر یکسو کننده‌ها (که در فصول آینده بحث خواهد شد) که به شبکه برق شهری با فرکانس ۵۰Hz یا ۶۰Hz وصل می‌باشند، تریستور معمولی بهترین انتخاب است، زیرا توانایی تحمل ولتاژهای مستقیم و معکوس زیاد از ضروریات این کاربرد است.

برای کاربردهایی که شامل تولید ولتاژ متناوب از منبع ولتاژ مستقیم است نظیر معکوس کننده‌ها (اینورترها)، تمامی این وسایل می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. لیکن بر حسب سرعت سوئیچینگ مورد نیاز یکی از آنها انتخاب می‌گردد. در مواقعی که به سرعت سوئیچینگ بالا نیاز است، یعنی در محدوده بالاتر از ۱۰۰kHz، MOSFET تنها وسیله مناسب است. MOSFETها در مبدلهای قدرت کم فرکانس بالا و در منابع تغذیه کاربرد وسیعی دارند. در محدوده فرکانسی ۲۰kHz تا ۱۰۰kHz ترانزیستور دو قطبی قابل رقابت است و در مقایسه با MOSFET دارای قیمت کمتر و تلفات هدایت کمتر است لیکن تلفات سوئیچینگ آن بیشتر است. در محدوده کمتر از ۱۵kHz خانواده تریستور، به ویژه تریستور قابل قطع باگیت (GTO) و تریستور نامتقارن، بواسطه استحکام بیشتر، تلفات هدایت کمتر و توانایی خوب در تحمل گذرا و اضافه‌بار قابل رقابت هستند.

خانواده ترانزیستور می‌توانند تا درجه حرارت ۲۰۰° C کارکنند در حالیکه خانواده تریستور تا ۱۲۵° C محدود می‌گردند. هزینه مربوط به تلفات وسیستم خنک سازی اغلب معیارهای مهمی در انتخاب می‌باشند. مدار آتش MOSFET در مقایسه با ترانزیستور دو قطبی و تریستور به تجهیزات کمتری نیاز دارد و این می‌تواند یک فاکتور مهم در انتخاب MOSFET باشد.

حفاظت وسایل در مقابل اتصال کوتاه در خانواده تریستور آسان‌تر است. این یکی از

عواملی است که پیشرفت ترانزیستورها را در تجهیزات با ظرفیت خیلی بالا محدود کرده است.

تحقیق و توسعه در جهت بهبود وسایل نیمه‌هادی قدرت موجود و رسیدن به سوئیچ الکترونیکی ایده‌ال بطور مداوم ادامه دارد. تحقیق و توسعه در جهت ایجاد وسیله جدید که بتواند مزایای روشن شدن سریع و امپدانس گیت زیاد MOSFET قدرت را با عمل قفل شدن احیایی[1] یا تثبیت جریان احیایی و تلفات حالت وصل ناچیز تریستور را بهم ارتباط دهد، ادامه دارد. تریستور قابل کنترل با MOS یا MCT وسیله جدیدی است که مزایای MOSFET و تریستور را دارا است.

بعضی از خواص این وسایل در جدول زیر مقایسه گردیده است:

جدول ۲-۱

مقایسه وسایل نیمه‌هادی قدرت

وسایل نیمه‌هادی قدرت	ظرفیت	سرعت سوئیچینگ
BJT	متوسط	متوسط
MOSFET	پائین	سریع
GTO	بالا	کند
IGBT	متوسط	متوسط

۲-۱۵ انواع مدارهای الکترونیک قدرت

برای کنترل توان الکتریکی، تبدیل انرژی الکتریکی از یک شکل به شکل دیگر ضرورت دارد. مشخصه‌های کنترل و سوئیچینگ (کلیدزنی) وسایل نیمه هادی قدرت این تبدیل انرژی را امکان‌پذیر می‌کند. با بکارگیری این عناصر در سیستم‌های الکترونیک قدرت به سادگی انرژی الکتریکی از شکلی به شکل دیگر با شرایط و توابع معین تبدیل می‌گردد. مبدلهای قدرت استاتیکی[2] با اتصال مناسب وسایل نیمه‌هادی قدرت، قادرند که این تبدیل انرژی را انجام دهند. علت اطلاق لفظ استاتیک به آنها این است که فاقد قسمت متحرک می‌باشند. همچنین باید

1- Regenerative latching action

2- Static power converters

www.iEPE.iR

خاطرنشان کرد که در سیستم‌های الکترونیک قدرت، مبدلها، انرژی الکتریکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نمایند.

مدارهای الکترونیک قدرت را می‌توان به انواع زیر طبقه‌بندی کرد:

- مبدلهای ac به dc (یکسو کننده‌ها یا رکتیفایرها) [1]
- مبدلهای ac به ac (کنترل کننده‌های ولتاژ ac) [2]
- مبدلهای dc به dc (برشگرها یا چاپرهای dc) [3]
- مبدلهای dc به ac (معکوس کننده‌ها یا اینورترها) [4]
- سوئیچ‌های استاتیکی [5]

مبدلهای ac به dc، در مدارهای یکسوکننده‌های دیودی، ولتاژ ac را به ولتاژ dc ودر مدارهای یکسوکننده تریستوری ولتاژ ac را به ولتاژ dc قابل کنترل، تبدیل می‌نمایند. به مبدلهای اخیر یکسوکننده‌های قابل کنترل [6] نیز گفته می‌شود. ولتاژ ورودی می‌تواند تکفاز و یا سه فاز باشد. این مبدلهای بطور گسترده در کاربردهای صنعتی بخصوص در محرکهای سرعت متغیر (VSD) [7] مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مبدلهای ac به ac، ولتاژ ثابت ac یک منبع تغذیه را به ولتاژ متغیر ac تبدیل می‌نمایند. به‌چنین مبدلهایی کنترل‌کننده‌های ولتاژ ac نیز اطلاق می‌گردد. کاربردهای مهم آن در صنعت، در گرم کننده‌های صنعتی، تپ چنجر ترانسفورماتور زیربار، کنترل روشنایی، کنترل دور موتورهای القایی چند فاز و کنترل مغناطیس‌ها است. این مبدلها گرچه ولتاژ خروجی متغیر را فراهم می‌نمایند، لیکن فرکانس آنها ثابت و برابر فرکانس ورودی است و در برگیرنده هارمونیک زیادی است (بخصوص در ولتاژهای خروجی کم). ولتاژ خروجی با فرکانس متغیر را می‌توان با تبدیل دو مرحله‌ای بدست آورد. به این صورت که ولتاژ ثابت ac را به dc متغیر تبدیل می‌کنیم (درمدارهای یکسو کننده قابل کنترل) و dc متغیر را به ac با فرکانس متغیر تبدیل می‌کنیم (اینورتر). البته می‌توان این عمل را بدون دخالت تبدیل انرژی میانی، بطور مستقیم بدست آورد. سیکلوکانورتر یا مبدل سیکل [8] وسیله‌ای است که مستقیماً با تبدیل ac به ac، فرکانس تغذیه ورودی را به فرکانس دیگری تبدیل می‌نماید.

مبدلهای dc به dc، ولتاژ ثابت‌منبع dc را به‌ولتاژ ثابت باسطوح متغیر تبدیل می‌نمایند. همان نقشی که ترانسفورماتورها در تغییر سطوح ولتاژ ac دارند، این مبدلها در تغییر سطوح ولتاژ

1- Rectifiers
2- ac voltage controllers
3- dc choppers
4- Inverters
5- Static switches
6- Controlled rectifiers
7- Variable Speed Drive
8- Cycloconverter

WWW.IEEE.IR

dc دارند. به چنین مبدلهایی برشگر یا چاپر گفته می‌شود. این مبدلها در کنترل موتورهای کششی لوکوموتیوبرقی، اتوبوسهای برقی، بالابرها، جرثقیل‌ها و نقاله‌ها بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین در رگولاتورهای ولتاژ dc کاربرد دارند.

مبدلهای dc به ac، ولتاژ dc ورودی را به ولتاژ خروجی ac با دامنه و فرکانس مورد نظر تبدیل می‌نمایند. این مبدلها در کنترل دور موتورهای ac، گرم کننده‌های صنعتی و منابع تغذیه بدون وقفه بطور وسیع بکار برده می‌شوند.

سوئیچ‌های استاتیکی وسایل نیمه‌هادی هستند که می‌توانند بصورت سوئیچ یا کنتاکتور عمل کنند و تغذیه آنها می‌تواند dc و یا ac باشد که به سوئیچ‌های استاتیک ac یا dc موسوم‌اند. در فصول آینده انواع مبدلهای فوق مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۱۶ مسائل حل شده

مسأله ۲-۱

در شکل ۲-۴۵ تریستور دارای جریان نگهدارنده ۵۰mA است و باپالس به طول ۵۰μs آتش می‌شود. نشان دهید که در غیاب مقاومت R، وقتی پالس آتش به پایان می‌رسد، تریستور نمی‌تواند روشن بماند و آنگاه حداکثر مقدار R را پیدا کنید که تریستور بتواند روشن بماند. از افت ولت تریستور صرفنظر نمایید.

حل - وقتی مقاومت R وجود ندارد، جریان عبوری از مدار به قرار زیراست.

$$i = I\,(۱ - e^{-t/T})$$

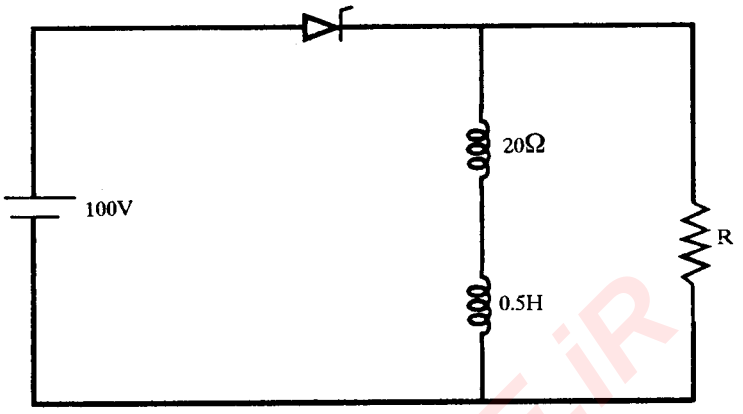
که در آن جریان نهایی برابر $I = \frac{E}{R} = \frac{۱۰۰}{۲۰} = ۵\,A$ و ثابت زمانی برابر $T = \frac{L}{R} = \frac{۰/۵}{۲۰} = ۰/۰۲۵s$ است. حال باید ملاحظه کنیم که پس از ۵۰μs جریان به چه مقداری می‌رسد یعنی

$$i = ۵\,(۱ - e^{-۵۰\times۱۰^{-۶}/۰/۰۲۵}) = ۱۰\ mA$$

چون این جریان به مقدار ۴۰ mA از جریان نگهدارنده کمتر است تریستور نمی‌تواند روشن باقی بماند. با اضافه کردن مقاومت R به مدار باعث می‌شود که بلافاصله جریان ۱۰۰/R برقرار گردد. با توجه به اینکه به جریان ۴۰mA دیگر نیاز داریم مقدار مقاومت لازم بدست می‌آید، یعنی

WWW.IEPE.IR

$$۴۰\times۱۰^{-۳} = ۱۰۰/R \rightarrow R = \frac{۱۰۰}{۴۰}\times ۱۰^{۳} = ۲/۵\ k\ \Omega$$



شکل ۲-۴۵

مسأله ۲-۲

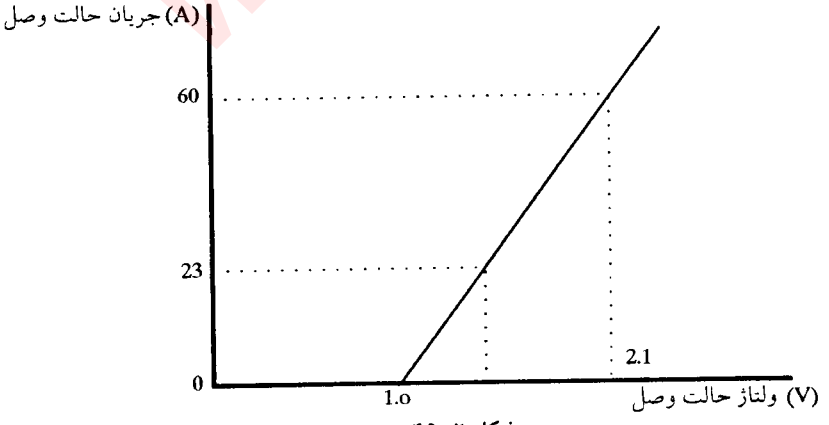
یک تریستور در گرایش مستقیم دارای مشخصه‌ای مطابق شکل ۲-۴۶ می‌باشد که با خط مستقیم تقریب زده شده است. مقدار متوسط توان تلفاتی را برای حالات زیر تخمین بزنید:

(الف) برای جریان پیوسته حالت وصل A ۲۳

(ب) برای جریان نیم موج سینوسی با مقدار متوسط A ۱۸

(پ) برای جریان ثابت A ۳۹/۶ در نیم سیکل

(ت) برای جریان ثابت A ۴۸/۵ در یک سوم سیکل



شکل ۲-۴۶

WWW.IEPE.iR

حل - (الف) معادله ولتاژ - جریان با توجه به شکل ۲-۴۶ از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$v = ۱ + \frac{۱/۱}{۶۰} i$$

وقتی جریان پیوسته ۲۳A از آن می‌گذرد با توجه به معادله فوق، افت ولت در حالت روشن بودن تریستور برابر خواهد بود با

$$v = ۱ + \frac{۱/۱}{۶۰} \times ۲۳ = ۱/۴۲ \ V$$

و در نتیجه تلفات توان قابل محاسبه است یعنی

$$\text{تلفات} = ۱/۴۲ \times ۲۳ = ۳۲/۷ \ W$$

(ب) در این حالت جریان یک نیم‌موج سینوسی است که حداکثر مقدار آن برابر است با

$$I_{dc} = \frac{I_m}{\pi} \qquad I_m = \pi I_{dc} = \pi \times ۱۸ = ۱۸\pi \ A$$

بنابراین در فاصله ۰ تا ۲π معادله جریان به قرار زیر است.

$$i = ۱۸\pi \sin x \qquad ۰ < x < \pi$$

$$i = ۰ \qquad \pi < x < ۲\pi$$

حال با معلوم بودن جریان و ولتاژ، مقدار متوسط توان تلف شده از رابطه زیر بدست می‌آید

$$\text{تلفات} = \frac{۱}{۲\pi} \int_{۰}^{۲\pi} vi \, dx = \frac{۱}{۲\pi} \int_{۰}^{\pi} (۱ + \frac{۱/۱}{۶۰} ۱۸\pi \sin x) ۱۸\pi \sin x dx + ۰ = ۳۲/۶ W$$

(پ) در این حالت چون در نیم سیکل جریان ثابت ۳۹/۶ آمپر عبور می‌کند افت ولت در نیم سیکل برابر است با

$$v = (۱ + \frac{۱/۱}{۶۰} \times ۳۹/۶) = ۱/۷۲۶ \ V$$

$$\text{تلفات توان در نیم‌سیکل} = ۳۹/۶ \times ۱/۷۲۶ = ۶۸/۳۵ \ W$$

چون در نیم سیکل بعدی جریان صفر است، تلفات در سیکل کامل نصف تلفات فوق خواهد بود یعنی

$$\text{تلفات} = ۶۸/۳۵ / ۲ = ۳۴/۲ \ W$$

WWW.IEPE.IR

(ت) در این حالت در یک سوم سیکل جریان ثابت ۴۸/۵ A عبور می‌کند و افت ولت در این فاصله برابر است با

$$v = (۱ + \frac{۱/۱}{۶۰} \times ۴۸/۵) = ۱/۸۹ \ V$$

$$\text{تلفات در یک سوم سیکل} = ۱/۸۹ \times ۴۸/۵ = ۹۱/۶۶ \ W$$

در نتیجه تلفات دریک سیکل برابر یک سوم تلفات فوق خواهد بود.

$$\text{تلفات} = ۹۱/۶۶ / ۳ = ۳۰/۵ \ W$$

لازم به تذکر است که مقدار موثر جریان فوق به ترتیب ۲۳ A، ۲۸ A، ۲۸ A، ۲۸ A، است. نزدیک بودن مقدار تلفات در حالتهای فوق نشان می‌دهد که مقدار موثر جریان دوره‌ای را می‌توان در تعیین مقادیر نامی مورد استفاده قرار داد.

مسأله ۲-۳

برای ترانزیستور مثال ۲-۳، منحنی‌ای را که مبین توان لحظه‌ای در خلال روشن شدن (وصل) و خاموش شدن (قطع) باشد، بدست آورید. همچنین ماکزیمم توان لحظه‌ای را تعیین نمائید.

حل - توان لحظه‌ای در خلال روشن شدن از رابطه زیر بدست می‌آید (به مثال ۲-۳ مراجعه شود).

$$P = i_C V_{CE} = ۱۲۰ \ (۱ - ۲/۵ \times ۱۰^{۴}t) \times ۱/۶ \times ۱۰^{۶}t$$

$$P = ۱۲۰ \times ۱/۶ \times ۱۰^{۶} \ (t - ۲/۵ \times ۱۰^{۴}t^{۲})$$

$$P = ۱۹۲ \times ۱۰^{۶} \ (t - ۲/۵ \times ۱۰^{۴}t^{۲})$$

معادله فوق بیانگر توان لحظه‌ای در خلال روشن شدن است که می‌توان منحنی تغییرات آن را رسم کرد. به‌ازاء مقادیر مختلف t جدول زیر بدست می‌آید.

زمان t (μs)	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰
توان لحظه‌ای P(W)	۸۴۰	۱۴۴۰	۱۸۰۰	۱۹۲۰	۱۸۰۰	۱۴۴۰	۸۴۰	۰

www.iEPE.iR

همانطوریکه ملاحظه می‌شود حداکثر توان لحظه‌ای برابر ۱۹۲۰W می‌باشد که در زمان ۲۰ میکرو ثانیه ایجاد می‌شود که می‌توان از مشتق گرفتن رابطه فوق نیز بدست آورد.

توان لحظه‌ای در خلال خاموش شدن (قطع) از رابطه زیر بدست می‌آید (به مثال ۲-۳ مراجعه شود)،

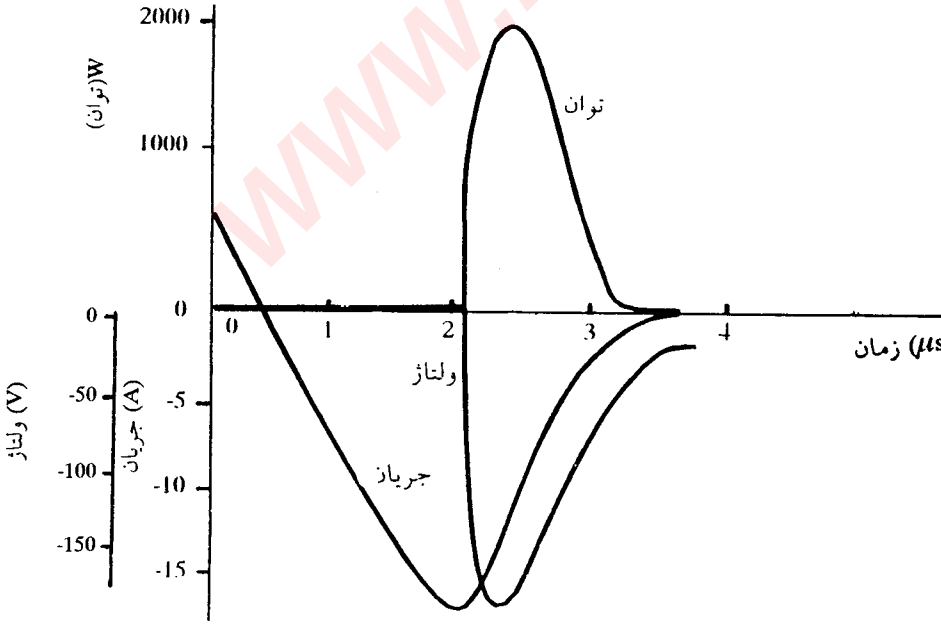
$$P = ۸۰\ (۱ - ۱/۶۶۷ \times ۱۰^{۲}t) \times ۱/۶ \times ۱۰^{۶}t$$

$$P = ۱۲۸ \times ۱۰^{۶}\ (t - ۱/۶۶۷ \times ۱۰^{۲}t^{۲})$$

به ازاء مقادیر t جدول زیر بدست می‌آید.

زمان t(μs)	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵
توان P(W)	۵۸۶/۷	۱۰۶۶/۷	۱۴۴۰	۱۷۰۶	۱۸۶۶/۷	۱۹۲۰	۱۸۶۶/۷	۱۷۰۶	۱۴۴۰	۱۰۶۶/۷	۵۸۶/۷

حداکثر توان در ۳۰ μs = t رخ می‌دهد و برابر ۱۹۲۰W می‌باشد.



شکل ۲-۴۷ شکل موج جریان و ولتاژ در خلال خاموش شدن

WWW.IEPE.IR

مسأله ۲-۴

شکل موج ولتاژ و جریان یک تریستور در خلال خاموش شدن در شکل ۲-۴۷ رسم شده است. منحنی تلفات توان را رسم کنید. تلفات انرژی و بار بازیابی (بازیافت) معکوس را بدست آورید.

حل - از حاصلضرب مقادیر لحظه‌ای ولتاژ و جریان، منحنی توان بدست می‌آید که در شکل ۲-۴۷ رسم شده است. تلفات انرژی از محاسبه سطح زیرمنحنی بدست می‌آید که تقریباً برابر ۱mJ است. بار بازیافت معکوس از محاسبه سطح زیرمنحنی جریان یعنی $\int idt$ بدست می‌آید که تقریباً برابر ۲۳ μc است. چون معادله منحنی‌ها مشخص نیست با تقسیم‌بندی سطح زیر منحنی به مربع‌های کوچک و شمردن آنها و در نظر گرفتن واحد محورها سطح زیر منحنی بدست می‌آید.

مسأله ۲-۵

یک تریستور دارای تلفات توان حالت پایدار ۳۲W است. اگر مقاومت حرارتی پیوند تا خنک‌کننده (گرماگیر) برابر ۰/۸۱° C/W باشد و درجه حرارت پیوند از ۱۳۰° C تجاوز نکند و درجه حرارت محیط ۴۲° C باشد حداکثر مقدار مقاومت حرارتی سیستم خنک کننده را تعیین نمائید. در این شرایط درجه حرارت پایه چقدر است؟

حل - با توجه به معادله (۲-۱) مقاومت حرارتی کل محاسبه می‌شود یعنی

مقاومت حرارتی کل = (۱۳۰ - ۴۲)/۳۲ = ۲/۷۵ ° C/W

مقاومت حرارتی خنک کننده = ۲/۷۵ - ۰/۸۱ = ۱/۹۴ ° C/W

درجه حرارت پایه = ۴۲ + (۳۲×۱/۹۴) = ۱۰۴ ° C

مسأله ۲-۶

یک تریستور با مقاومت حرارتی ۱/۸° C/W بر روی یک خنک کننده (گرماگیر) دارای مقاومت حرارتی ۲° C/W نصب شده است. اگر درجه حرارت محیط ۴۰° C باشد و درجه حرارت پیوند از ۱۲۵° C تجاوز ننماید، حداکثر تلفات توان چه مقدار خواهد بود.

حل - با استفاده از معادله (۲-۱) حداکثر مقدار تلفات بدست می‌آید.

مقاومت حرارتی کل R = ۱/۸ + ۲ = ۳/۸° C/W

تلفات توان p= (۱۲۵ - ۴۰) / ۳/۸ = ۲۲/۴ W

WWW.IEEE.IR

مسأله ۲-۷

تریستوری دارای ظرفیت حرارتی ۰/۱ J/°C و مقاومت حرارتی ۰/۹ °C/W می‌باشد. تلفات توان کوتاه مدت مجاز را محاسبه نمائید طوریکه در شرایط زیر درجه حرارت آن از ۴۰°C تجاوز نکند:

(الف) در فاصله زمانی ۰/۰۱ s

(ب) در فاصله زمانی ۰/۱ s

(پ) در فاصله زمانی ۱ s

همچنین امپدانس حرارتی گذرا را محاسبه نمایید.

حل - ۱/۱۱ W/C° = ۱ / ۰/۹ = مقاومت حرارتی / ۱ = توان تلف شده برای افزایش ۱°C

و با توجه به معادله (۲-۶) ثابت زمانی T محاسبه می‌شود یعنی $T = \frac{۰/۱}{۱/۱۱} = ۰/۰۹\ s$

(الف) اگر پس از ۰/۰۱ s افزایش درجه حرارت ۴۰°C باشد آنگاه با توجه به معادله (۲-۴)

داریم :

$$۴۰ = \theta_{max}(۱ - e^{-۰/۰۱/۰/۰۹})$$

$$\theta_{max} = ۳۸۰°C$$

با توجه به معادله (۲-۵)، تلفات توان محاسبه می‌شود یعنی

$$P = B.\theta_{max} = ۱/۱۱ \times ۳۸۰ = ۴۲۲\ W$$

با محاسبه مشابه برای حالتهای دیگر خواهیم داشت.

(ب) $\theta_{max} = ۵۹/۶°$ و $P = ۶۶/۲\ W$

(پ) $\theta_{max} = ۴۰\ °C$ و $P = ۴۴/۴\ W$

با استفاده از مقادیر توان فوق و معادله (۲-۷) می‌توان مقادیر امپدانس حرارتی گذرا را محاسبه کرد، بنابراین

امپدانس حرارتی گذرا برای ۰/۰۱ s = ۴۰/۴۲۲ = ۰/۰۹°C / W

امپدانس حرارتی گذرا برای ۰/۱ s = ۴۰/۶۶/۲ = ۰/۶۰°C / W

امپدانس حرارتی گذرا برای ۱ s = ۴۰/۴۴/۴ = ۰/۹°C / W

WWW.IEPE.IR

مسأله ۲-۸

تریستوری درخلال روشن شدن ازشرایط سرد بادرجه حرارت ۴۰C° ،جریان یورشی را تحمل می‌نماید که در مدت ۱۰ ms تلفات ۲۰۰۰ W را ایجاد می‌کند. در صورتی که امپدانس حرارتی گذرا برای این مدت زمان ۰/۰۳°C/W باشد درجه حرارت پیوند را محاسبه نمایید.

حل - با توجه به معادله (۲-۷) افزایش درجه حرارت پس از ۱۰ms برابر است با

$$۲۰۰۰ \times ۰/۰۳ = ۶۰^\circ C$$

بنابراین با افزودن درجه حرارت به درجه حرارت محیط، درجه حرارت پیوند بدست می‌آید، یعنی:

$$۴۰ + ۶۰ = ۱۰۰\ ^\circ C$$

مسأله ۲-۹

یک تریستور به انضمام گرماگیر آن برای حالت ماندگار دارای مقاومت حرارتی ۰/۲°C/W و برای مدت ۱۰ ms دارای مقاومت حرارتی ۰/۰۵°C/W است. اگر چنانچه تلفات حالت ماندگار ۳۰۰ W باشد، تریستور در مدت زمان ۱۰۰ms چه تلفاتی را تحمل خواهد کرد در صورتی که درجه حرارت پیوند از ۱۲۵°C تجاوز نکند. درجه حرارت محیط ۳۰°C است.

حل - ابتدا درجه حرارت حالت ماندگار پیوند را به ازاء توان ۳۰۰W محاسبه می‌کنیم، با توجه به معادله (۲-۳) داریم:

$$۳۰ + (۳۰۰ \times ۰/۲) = ۹۰^\circ C$$

بنابراین در خلال ۱۰۰ms اضافه بار، درجه حرارت پیوند می‌تواند ۳۵°C دیگر یعنی (۹۰-۱۲۵) افزایش یابد که منجر به افزایش توان تلفاتی ۷۰۰W = ۰/۰۵ /۳۵ می‌گردد. بنابراین تلفات کلی برابر است با

$$۳۰۰ + ۷۰۰ = ۱۰۰۰W$$

مسأله ۲-۱۰

دو دیود که دارای مشخصه گرایش مستقیم زیر هستند، بطور موازی متصل شده‌اند، اگر

www.iEPE.IR

جریان کل ۲۰۰۰A باشد، جریان عبوری از هر دیود را پیدا کنید.

$$v_{\text{دیود ۱}} = ۰/۸۸ + ۲/۴۴ \times ۱۰^{-۲}\, i$$
$$v_{\text{دیود ۲}} = ۰/۹۶ + ۲/۳۲ \times ۱۰^{-۲}\, i$$

حل - اگر جریان عبوری از دیودها به ترتیب $i_۱$ و $i_۲$ باشد داریم:

$$i_۱ + i_۲ = ۲۰۰۰\ A$$
$$۰/۸۸ + ۲/۴۴ \times ۱۰^{-۲}\, i_۱ = ۰/۴۶ + ۲/۳۲ \times ۱۰^{-۲}\, i_۲$$

از حل دو معادله جریانهای $i_۱$ و $i_۲$ بدست می‌آیند یعنی

$$i_۱ = ۱۱۴۲/۹\ A \qquad i_۲ = ۸۵۷/۱\ A$$

مسأله ۲-۱۱

زنجیره‌ای شامل سه تریستور با اتصال سری مطابق شکل ۲-۴۸ می‌باشد و طوری طراحی شده است که بتواند ولتاژ حالت قطع ۷/۲ kV را تحمل نماید. اگر مدار جبران کننده دارای مقادیر زیر باشد.

$$R_۱ = ۳۰\Omega \quad \text{و} \quad R_۲ = ۲۴۰۰۰\Omega \quad \text{و} \quad C = ۰/۰۸۸\mu F$$

ولتاژ دو سر هر تریستور را درحالت قطع حساب کنید همچنین جریان تخلیه هرخازن را در روشن شدن بدست آورید.

جریان نشتی تریستورها به ترتیب $T_۱ = ۱۸mA$ ، $T_۲ = ۲۴\ mA$ و $T_۳ = ۱۶mA$ می‌باشد.

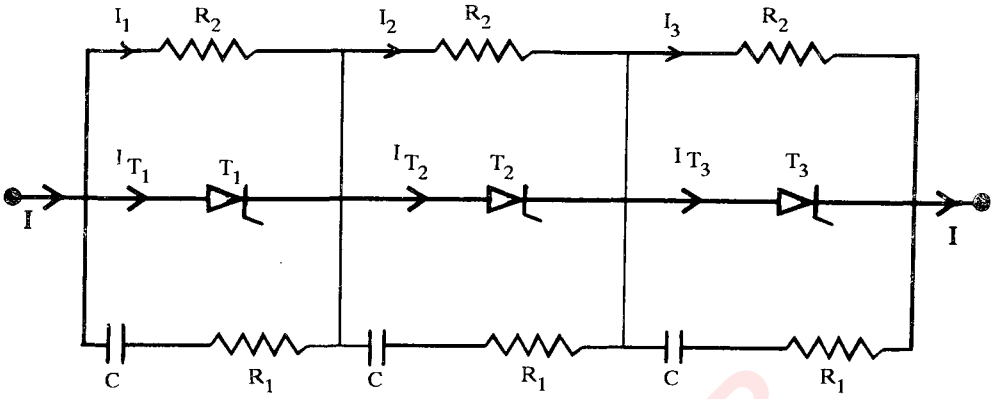
حل - با مراجعه به شکل ۲-۴۸ و معلوم بودن جریانهای $I_{T_۱}$ و $I_{T_۲}$ و $I_{T_۳}$ ، می‌توان جریان عبوری از مقاومتهای $R_۲$ را محاسبه نمود یعنی:

$$I_۱ = I - I_{T۱} = I - ۰/۰۱۸\ A$$

$$I_۲ = I - I_{T۲} = I - ۰/۰۲۴\ A$$

$$I_۳ = I - I_{T۳} = I - ۰/۰۱۶\ A$$

www.iEPE.iR



شکل ۲-۴۸

با توجه به ولتاژ اعمال شده به زنجیر داریم.

$$۷/۲ \times ۱۰^{۳} = R_{۲} I_{۱} + R_{۲} I_{۲} + R_{۲} I_{۳}$$

$$۷/۲ \times ۱۰^{۳} = ۲۴۰۰۰(I_{۱} + I_{۲} + I_{۳})$$

$$۷/۲ \times ۱۰^{۳} = ۲۴۰۰۰(I - ۰/۰۱۸ + I - ۰/۰۲۴ + I - ۰/۰۱۶)$$

$$۷/۲ \times ۱۰^{۳} = ۲۴۰۰۰(۳I - ۰/۰۵۸) \Rightarrow I = ۰/۳۵۸/۳ \text{ A}$$

با معلوم بودن مقدار فوق ولتاژ دو سر هریک از تریستورها بدست می‌آید یعنی

$$V_{T_{۱}} = R_{۲} I_{۱} = ۲۴۰۰۰(۰/۳۵۸/۳ - ۰/۰۱۸) = ۲۴۳۲ \text{ V}$$

$$V_{T_{۲}} = R_{۲} I_{۲} = ۲۴۰۰۰(۰/۳۵۸/۳ - ۰/۰۲۴) = ۲۲۸۸ \text{ V}$$

$$V_{T_{۳}} = R_{۲} I_{۳} = ۲۴۰۰۰(۰/۳۵۸/۳ - ۰/۰۱۶) = ۲۴۸۰ \text{ V}$$

جریان تخلیه هر خازن در لحظه روشن شدن تریستور، با معلوم بودن ولتاژ و مقاومت $R_{۱}$ بدست می‌آید یعنی

$$I_{۱} = ۲۴۳۲/۳۰ = ۸۱/۱ \text{ A}$$

$$I_{۲} = ۲۲۸۸/۳۰ = ۷۶/۲۶ \text{ A}$$

$$I_{۳} = ۲۴۸۰/۳۰ = ۸۲/۶۷ \text{ A}$$

www.iEPE.iR