بسمه تعالی

جزوه

الکترونیک ۱

دانشگاه

تهران

استاد

دکتر حمیدرضا جمالی

فصل ۱

دیودهای نیمه هادی

۱-۱ : مقدمه

عناصر نیمه هادی در دهه اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند، قسمت اصلی تشکیل دهنده الکترونیک مدرن می باشند. جایگزین شدن عناصر حالت جامد[۱] بجای لامپ های خلا[۲] باعث افزایش اطمینان[۳]، کاهش اندازه، کاهش تلف توان[۴] سیستم های الکترونیکی شده و این عناصر مزایای مداری مختلف پیچیده را در عملکردهای خاصی دارند، که بطور آشکار نمود.

قبل از بررسی مشخصات این عناصر، لازم است در مختصر ساختمان اتمی عناصر را مورد مطالعه قرار دهیم. گرچه این عناصر مختلف تشکیل دهنده مواد متفاوت مشخص دارند، ولی همه آنها از ذرات اساسی یکسان تشکیل یافته اند. این ذرات عبارتند از الکترونها، پروتونها، نوترونها که در اتم تشکیل دهنده هر عنصری وجود دارند. تا حال بیش از ۱۵۵ عنصر مختلف شناخته شده اند که ترتیب قرارگرفتن ذرات فوق در اتم این عناصر با یکدیگر متفاوت می باشند. بعنوان مثال، آهن، مس، هیدروژن و طلا عناصری هستند که هرکدام دارای ساختمان اتمی خاص خود هستند. اتم هرکدام از عناصر مس و آهن در تعداد و ترتیب قرارگرفتن ذرات بنیادی فوق الذکر با یکدیگر متفاوت می باشند.

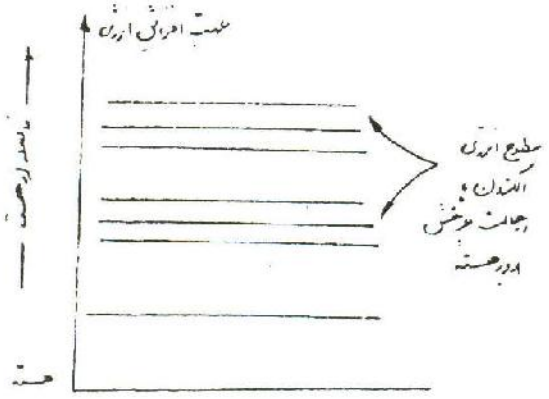
طبق مدل اتمی بوهر[۵]، هر اتم از یک هسته مرکزی تشکیل شده که الکترون ها دور آن حرکت می کنند. هسته مرکزی هر اتمی متشکل از تعدادی پروتون و نوترون است. نوترون و پروتون با الکترون دارای خاصیت الکتریکی نیستند. جرم پروتونها ۲۰۰۰ بار بیشتر از جرم الکترونها بوده و با جرم نوترون یکسان می باشد. بار الکتریکی الکترون و پروتونها فی نفسه هم اندازه و هر الکترون توسط الکترون دیگر دفع شده، در حالی که توسط پروتون جذب می شود. بار الکتریکی الکترونها منفی است، در حالی که بار الکتریکی پروتونها مثبت است. مقدار بار الکتریکی هرکدام از الکترونها یا پروتونها در حدود $1.6\times10^{-19}\ C$ است. نوترون دارای بار الکتریکی نیست.

---

(۱) Solid state devices
(۲) Vacuum tube
(۳) reliability
(۴) power consumption
(۵) Bohr

www.ftnar.ir

الکترونها در لایه‌های خاصی با سطوح انرژی مخصوص دور هسته مرجحند . الکترونهائی در نزدیک هسته اتم می‌باشند دارای انرژی کمتری از الکترونهای دورتر از هسته می‌باشند . سطوح انرژی مختلف در یک اتم بطور شماتیک در شکل ۱-۱ نشان داده شده است . معمولاً انرژی الکترون بر حسب الکترون ولت (eV) مشخص می‌گردد در باره انرژی است که یک الکترون را در میدانی با اختلاف پتانسیل یک ولت می‌باشد حرکت در آورد .



شکل ۱-۱ : یک اتم منفرد الکترونها و سطوح انرژی خاص در هسته مرجحند : هرچه فاصله الکترون از هسته زیادتر باشد سطح انرژی آن نیز بزرگتر خواهد بود .

در جامد اتمها به قدری به هم نزدیک گرفته‌اند قرار می‌گیرند بحدی که تحت تاثیر اتمهای همجوار در هم ، سطوح انرژی اتمهای مختلف یک جسم نظیر شکل ۱-۱ نخواهد بود . بلکه بعلت این تاثیر اتمها بجای داشتن سطوح انرژی دارای باندهای انرژی[1] خواهند بود . پهنای این باندهای انرژی ، باندهای انرژی غدغن[2] ، با شکاف انرژی[3] وجود دارد در داخل باندهای سطوح انرژی هیچ الکترونی نمی‌تواند وجود داشته باشد .

با تحرک اتم توسط یک انرژی خارجی ، الکترونها از یک باند انرژی می‌توانند به انرژی باند غدغن صعود کرده و به باند انرژی بالاتری منتقل شوند . برروی تراز باند انرژی که اتم تحرک نیافته را باند ظرفیت[4] می‌نامند . چنانچه اتم تحت تاثیر یک انرژی قرار گیرد ، در اینصورت ممکن است در الکترونهای باند ظرفیت آن در باند هدایت[5] قرار گیرند در داخل این باند می‌توانند آزادانه و بدون اینکه وابسته به یک اتم مشخص باشند حرکت نمایند . در شکل ۲-۱ باندهای ظرفیت و هدایت و شکاف انرژی موجود بین آنها بطور شماتیک نشان داده شده است .

شکاف انرژی موجود بین باند ظرفیت و باند هدایت ، یک پارامتر مهم در بررسی رفتار الکتریکی عناصر می‌باشد . در بعضی از عناصر شکاف انرژی بین این دو باند زیاد است بطوری که الکترونهای باند ظرفیت نمی‌توانند به راحتی به باند هدایت منتقل شوند . چنین عناصری عایق الکتریکی[6] هستند . از طرف دیگر ، در برخی از عناصر باندهای ظرفیت و هدایت یکدیگر را پوشانده بطوری که الکترونها از باند ظرفیت آسانگی در باند هدایت قرار می‌گیرند . چنین عناصری هادی‌های الکتریکی[7] هستند .

در برخی دیگر از عناصر مقدار شکاف انرژی ، بین دو حد عایق و هادی قرار دارد . چنین عناصری را نیمه‌هادی[8] می‌نامند .

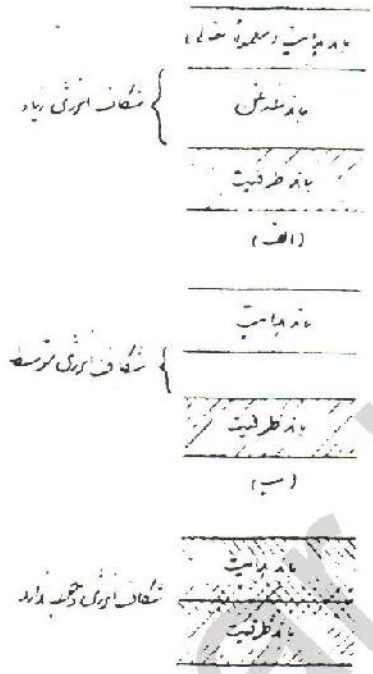
شکل ۳-۱ باندهای ظرفیت و هدایت و همچنین شکاف انرژی موجود بین آنها را برای عناصر فوق الذکر نشان می‌دهد .

---

(۱) energy band
(۲) Forbidden energy band
(۳) energy gap
(۴) Valance band
(۵) Conduction band
(۶) electric insulator
(۷) electric conductor
(۸) Semiconductor

www.tfnet.ir

شکل ۲-۱ : باند انرژی شبکه اتم عناصر . جهتی
عدد شکاف انرژی را نشان دهد که مانع عبور
الکترون از باند ظرفیت به باند هدایت می شود .



شکل ۳-۱ : طبقه بندی خاصیت الکتریکی مواد براساس عرض
شکاف انرژی موجود بین باندهای هدایت و ظرفیت ؛
الف) عایق ؛ ب) نیمه هادی ؛ ج) هادی .

۲-۱ : پیوند کووالانسی[1]

گرچه تعداد زیادی از عناصر دارای خاصیت نیمه هادی الکتریکی هستند ، ولی در اینجا به بررسی عناصر سیلیکن و ژرمانیم که دارای کاربرد وسیعی در الکترونیک می باشند ، می پردازیم . این عناصر (سیلیکن و ژرمانیم) عناصر چهار ظرفیتی بوده که در باند ظرفیت دارای چهار الکترون هستند [تعداد الکترونهای سیلیکن 14 و ژرمانیم 32 است] . علاوه بر سیلیکن و ژرمانیم عناصر دیگر نیز لطر گرفته و ترکیباتی مثل گالیم ارسنید (GaAs) می توانند به صورت نیمه هادی مورد استفاده قرار گیرند ، ولی به علت مشکلات عملی کاربرد سیلیکن و ژرمانیم در ساخت قطعات الکترونیکی بطور وسیعی افزایش یافته است .

عناصر سیلیکن و ژرمانیم هردو دارای ساختمان کریستالی هستند . ساختمان کریستالی این عناصر نظر اکثر جامدات ، بصورت سه بعدی و منظم است [عناصری که بصورت نیمه هادی بکار می روند دارای کریستال منفرد پیوسته می باشند ، یعنی در تمام نمونه ، شبکه بطور منظم اتمها تکرار شده و دارای تغییرات ناگهانی نیست . اگر یک نمونه بیش از یک نوع کریستال [مواد چند کریستاله[2]] موجود باشد در اینصورت مرز این کریستالها روی مشخصات نمونه اثر گذاشته و مشکلاتی در کنترل و پیش بینی عملکرد الکتریکی عنصر بوجود می آورد] .

---

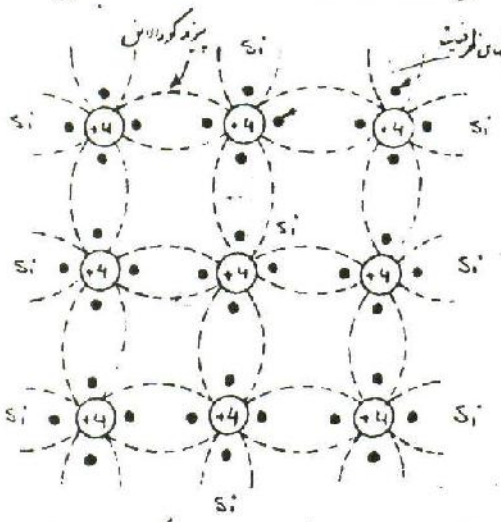
(1) The covalent bond

(2) polycrystalline materials

www.tiran.ir

ساختمان سه بعدی کریستالهای سیلیکن و ژرمانیم بصورت هرم چهار وجهی مرتب شده و هر اتم آن در مرکز هرم قرار گرفته است.

برای بررسی ساختمان این عناصر، ساختمان کریستالی آن بصورت دو بعدی در شکل ٤-١ نشان داده شده است. الکترونهای ظرفیت هر یک از اتمها، در این شبکه کریستالی چهار الکترون ظرفیت هر یک از اتمها، الکترونهای ظرفیت اتمهای مجاور خود به اشتراک گذاشته شده و پیوند ظرفیتی[1] تشکیل میدهند. بنابراین در اینجا هر اتم، دارای چهار الکترون ظرفیت نموده لکن در مدار خارجی آن هشت الکترون مشترک با سایر اتمها مجاور قرار خواهد گرفت. این به اشتراک گذاشتن الکترونها باعث پیوند هر اتم با اتمهای مجاور خواهد شد. الکترونهایی که در این پیوندهای کووالانسی قرار میگیرند، الکترونهای آزاد محسوب نمی‌گردند و در ایجاد الکتریکی شرکت نمینمایند. این الکترونها بسته به میزان انرژی که دارند و بر این ترتیب این عناصر دارای چهار الکترون ظرفیت، در دمای صفر مطلق الکتریکی خوب نمیباشند.



شکل ٤-١ : ساختمان کریستالی سیلیکن (بصورت دوبعدی).

اگر به اتمهای این عناصر انرژی کافی داده شود، در اینصورت بعضی از این پیوندها شکسته شده و الکترونهای باند ظرفیت وارد باند هدایت شده و نظیر الکترون آزاد عمل میکنند و در این ترتیب هدایت الکتریکی آن افزایش پیدا میکند.

انرژی لازم برای تحریک اتمها و شکستن پیوندهای کووالانسی میتواند بصورت انرژی نورانی و یا حرارتی و یا الکتریکی بعنصر اعمال شود.

گفتیم هادی خالص در آن تمامی الکترونهای باند ظرفیت تشکیل پیوند کووالانسی میدهند بصورتیکه عایق عمل میکند. در اینحالت سطح انرژی باند هدایت خالی است. در درجه حرارت اطاق، انرژی حرارتی کافی برای شکستن بعضی از پیوندهای ظرفیتی وجود دارد. بنابراین برخی از پیوندها شکسته شده و الکترونهای آزاد میشوند. اما اگر نیمه هادی سرد شود و درجه حرارت آن به صفر مطلق برسد، در اینصورت انرژی حرارتی از بین رفته و تمامی الکترونها عناصر تشکیل پیوندهای ظرفیتی خواهند داد (مگر اینکه شکل دیگری از انرژی به عنصر اعمال شده باشد). در اینحالت، عنصر بصورت عایق هدایت نخواهد کرد.

١-٣ : حفره[2]

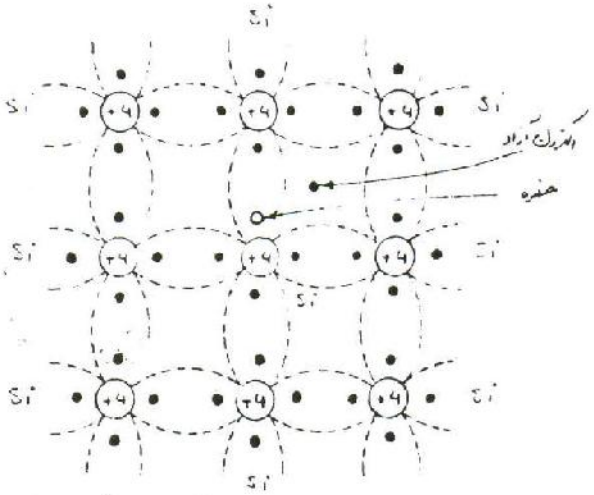
گفته شد، در درجه حرارت صفر مطلق (0^K) ساختمان کریستالی نیمه‌هادی از نظر تئوری بصورت شکل ٤-١ است. یعنی در این درجه حرارت الکترونها تماماً در باند ظرفیت قرار گرفته و نیمه‌هادی نظیر یک عایق عمل میکند (بعلت اینکه هیچ الکترون

---

(1) Coevalent bond (2) hole

www.ftnar.ir

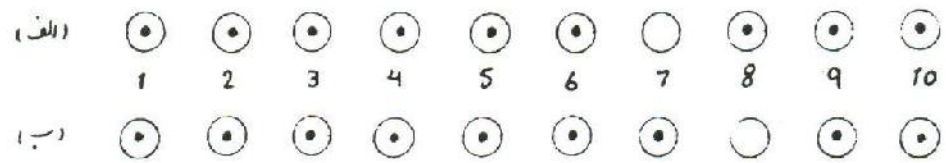
آزاد در باند هدایت دارد) . اگر در دمای حرارت اتاق [300^{ok}] بعضی از الکترونهای باند ظرفیت انرژی کافی کسب کند و پیوند کووالانسی خود را شکسته و وارد باند هدایت می‌شوند [از باند عبور می‌کنند] . این عمل در شکل ۵-۱ نشان داده شده است .



شکل ۵-۱ : کریستال سیلیکن با یک پیوند شکسته .

در اینجا یک الکترون ، باند ظرفیت را ترک کرده و وارد باند هدایت شده است . انرژی لازم برای شکستن چنین پیوندی در سیلیکن 1.1^{eV} و در ژرمانیم 0.72^{eV} (در دمای حرارت معمولی 300^{ok}) می‌باشد . حال خالی الکترون در باند ظرفیت توسط یک دایره‌ی خالی نشان داده شده است . چنین وضعیتی را در یک سطح خالی از الکترون نشان می‌دهیم حفره می‌نامند . اهمیت حفره در این است که نظر الکترون حامل جریان الکتریکی بوده و نظر الکترون آزاد عمل می‌نماید تشریح می‌گردد .

هنگامی که یک پیوند از الکترون خالی شده و حفره ای بوجود می‌آید ، در نتیجه الکترون های ظرفیت اتمهای مجاور در باند ظرفیت به سادگی قادر به اشغال این حفره هستند . الکترون که از یک پیوند کووالانسی دیگر ، این حفره را اشغال می‌کند خود یک حفره در جای می‌گذارد . بنابراین می‌توان برای حرکت الکترون ها در باند ظرفیت تصور نمود که در آن باند حفره ها حرکت می‌نمایند . حرکت حفره ها در خلاف جهت حرکت الکترون ها می‌باشد . حفره جدیدی که بوجود می‌آید بنوبه خود توسط الکترون دیگری از پیوند دیگری اشغال شده و بنابراین حفره قبلی به بعد در خلاف جهت حرکت الکترون ها حرکت خواهد نمود . بنابراین در نیمه هادی‌های دیگری از هدایت الکتریکی در دو نوع هستیم که مربوط به الکترونهای آزاد می‌باشد . این داده در شکل ۶-۱ بطور شماتیک نشان داده شده است که در آن یک دایره با نقطه ای در داخل آن اشغال یک وضعیت را در باند ظرفیت توسط الکترون نشان می‌دهد و دایره‌ی خالی مشخص کننده یک حفره است . حال تصور می‌کنیم که الکترون وضعیت 8 به داخل حفره وضعیت 7 برود (شکل ۶-۱-ب)

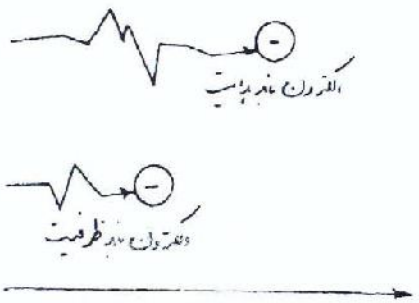


شکل ۶-۱ : تقسیم هدایت الکتریکی توسط حفره .

www.itnar.ir

در این حالت می‌توان چنین تصور کرد که حفره در جهت عکس الکترون حرکت نموده است. بنابراین حرکت الکترون در باند ظرفیت با جریان معادل حرکت حفره در خلاف جهت آن برابر است.

حال ببینیم چرا باید به اینکه حرکت حفره معادل حرکت الکترون است، از مفهوم حفره استفاده می‌شود؟ با کمی دقت ملاحظه می‌شود که در حرکت حفره‌ها، حرکت الکترون‌های باند ظرفیت بوده ولی حرکت الکترون‌های آزاد در باند هدایت صورت می‌گیرد. برای بیان آسان‌تر بحث حرکت الکترون در باندهای ظرفیت و هدایت از مفهوم حفره کمک می‌گیریم. به عنوان مثال فرض می‌شود که نیمه‌هادی تحت تاثیر یک میدان خارجی قرار گیرد یعنی به دو سر آن ولتاژی اعمال شود. در این صورت الکترون‌های آزاد باند هدایت در اثر تاثیر نیروی وارده از میدان شتاب می‌گیرند، و در این باند در خلاف جهت میدان اعمال شده حرکت خواهند نمود. الکترون‌های باند ظرفیت دارای وضعیت دیگری خواهند بود. انرژی این الکترون‌ها به اندازه‌ای نیست که وارد باند هدایت گردند، ولی می‌توانند در همان باند ظرفیت حرکت کرده و حفره‌ها را اشغال نمایند. بنابراین حرکت این الکترون‌ها متفاوت از الکترون‌های آزاد باند هدایت می‌باشد. در حقیقت برای هر ولتاژ اعمال شده به دو سر نیمه‌هادی، یک الکترون در باند ظرفیت فاصله متوسط کوتاهتری از الکترون‌های باند هدایت را در فاصله زمانی کمتر طی خواهد نمود (شکل ۷-۱).



شکل ۷-۱ : برای یک ولتاژ مشخص، در فاصله‌ای کمتر الکترون باند هدایت فاصله‌ای بیشتری از الکترون باند ظرفیت را طی می‌کند.

بنابراین می‌توان گفت که الکترون‌های آزاد دارای تحرک بیشتری از حفره‌ها هستند.

همانطور که گفته شد در دمای معمولی اطاق تعدادی از پیوندهای کووالانسی شکسته شده و با از هم شکسته شدن هر پیوند یک جفت الکترون - حفره تولید می‌شود. الکترون و حفره هر دو حامل‌های بار دار[1] می‌باشند. با اعمال یک پتانسیل الکتریکی به دو سر قطعه‌ی نیمه‌هادی، این حامل‌ها هر دو حرکت نموده و جریان را جمع می‌آورند. هدایتی که به این ترتیب در نیمه‌هادی‌ها به وجود می‌آید، هدایت ذاتی[2] نیمه‌هادی است که به علت خاصیت ماده خالص خود نیمه‌هادی صورت می‌گیرد. همانطور که بعداً خواهیم دید، هدایت نیمه‌هادی را می‌توان با افزودن ناخالصی به آن کنترل نمود.

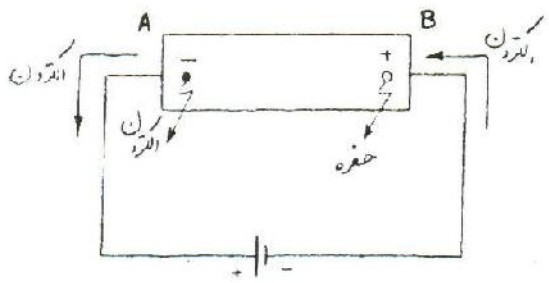
برای بررسی هدایت ذاتی، به عنوان مثال، یک قطعه نیمه‌هادی خالص نظیر شکل ۸-۱ را در یک منبع تغذیه متصل شده، در نظر می‌گیریم. گرچه در این قطعه تعداد زیادی الکترون و حفره موجود است، ولی برای سادگی فرض می‌شود که در این قطعه تنها یک جفت

(1) Charge carriers (2) intrinsic Conduction

www.tnar.ir

الکترون ـ حفره در نیمه هادی ذاتی به وجود آمده باشد . در این صورت مراحل زیر اتفاق می افتند :

۱ . الکترون های آزاد داخل قطعه به طرف ترمینال A کشیده شده و توسط سیم اتصال به طرف قطب مثبت باتری حرکت می نمایند . همچنین از قطب منفی باتری الکترونهایی به طرف ترمینال B حرکت کرده و تحت اثر این جریان الکترونی در مدار (جریان الکترون) در خلاف جهت حفره های ساعت برقرار می شود .



شکل ۸-۱ : هدایت ذاتی در نیمه هادی .

۲ . حفره های قطعه نیمه ای به طرف ترمینال B حرکت نموده و توسط الکترونهایی که از این ترمینال وارد قطعه می شوند خنثی می گردند . این عمل یک مرحله ترکیب مجدد [1] را نشان می دهد . در همین لحظه بعضی از پیوندهای باند ظرفیت شکسته شده و حفره الکترون حفره تولید شده و الکترونها به طرف ترمینال A رفته و وارد قطب مثبت باتری می شوند . شکستن یک پیوند ظرفیتی عمل تولید بار [2] را نشان می دهد . حفره های ایجاد شده نیز به طرف B حرکت کرده و در B با الکترونهای وارد شده از قطب مثبت ترکیب مجدد می شوند . این دوره حرکت حفره ها را در جهت عقربه های ساعت نشان می دهد .

۳ . عمل ایجاد حفره الکترون ـ حفره و ترکیب مجدد آنها یک دوره پیوسته است . در داخل نیمه هادی حفره و حفره ها به حفره ای در ترمینال B از بین رفته و در ترمینال A باز عمل ایجاد حفره جدید ظاهر می شود . با توجه به مدار خارجی ملاحظه می شود که جریان به سیم های اتصال فقط جریان الکترونها بوده که در خلاف جهت عقربه های ساعت است . تنها در داخل نیمه هادی جریان به دو صورت جریان الکترون و حفره تقسیم می شود .

در یک نیمه هادی خالص تعداد حفره ها برابر تعداد الکترون های آزاد می باشد . در حالت تعادل حرارتی همواره حفره الکترون ـ حفره ای تشکیل می شود که حاصل عمل الکترون ـ حفره دیگر بر اثر ترکیب مجدد از بین خواهد رفت . اگر انرژی حرارتی به نیمه هادی اعمال شود در نتیجه حفره الکترون ـ حفره های جدیدی تولید شده و باعث کاهش مقاومت اهمی نیمه هادی می شود (مقاومت یک میله ای شکل ساخته شده از نیمه هادی ژرمانیم در درجه حرارت معمولی $300^{\circ}K$ برابر $45\,\Omega$ و سیلیکن برابر $230,000\,\Omega$ می باشد . مقاومت نیمه هادی سیلیکن به علت داشتن انرژی باند ممنوعه $1.1\,eV$ در مقابل $0.72\,eV$ ژرمانیم است) .

اگر در یک نیمه هادی خالص غلظت الکترونهای آزاد را با n و غلظت حفره ها را با p نشان دهیم در این صورت خواهیم داشت :

$$n = p = n_i \qquad (1-1)$$

---

(1) recombination (2) generation

www.tnar.ir

در آن n_i غلظت ذاتی[1] نیمه‌رسانا نامیده شده و تابع درجه حرارت است.

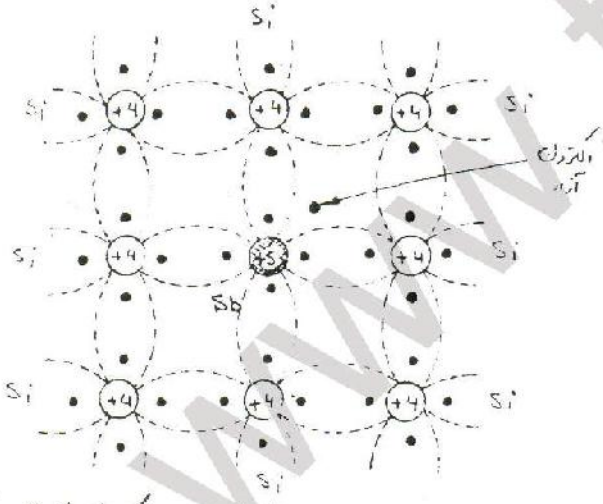
۴-۱ : نیمه‌هادی تزریق شده[2]

تا حال بحث ما در محدوده‌ی رسانایی نیمه‌رساناهای خالص بود. این نوع رسانایی در اثر ایجاد حفره‌ی الکترون بوسیله انرژی حرارتی یا منابع دیگر انرژی صورت می‌گیرد، رسانایی ذاتی نامیده شد. نیمه‌رساناهای خالص بعلت اینکه طریق عملی برای کنترل رسانایی آن وجود ندارد کاربرد چندانی در الکترونیک ندارند. برای کنترل و پیش‌بینی خواص نیمه‌رساناها در اندازه‌های تجاری از ناخالصی‌های مختلف به آن می‌افزایند. افزودن ناخالصی به نیمه‌رسانا را تزریق[3] می‌نامند.

ناخالصی‌های پنج ظرفیتی در نیمه‌رساناهای سیلیکن و یا ژرمانیم افزوده می‌شوند، اتمهای 5 ظرفیتی را یا 3 ظرفیتی می‌نامند در زیر به بررسی اثر هرکدام از آنها در نیمه‌رساناهای خالص می‌پردازیم.

اتمهای بخشنده[4]

هرگاه اتمهای ناخالصی افزوده شده به نیمه‌رسانای خالص یک اتم 5 ظرفیتی* باشد، یعنی در لایه ظرفیت خود دارای 5 الکترون باشد، در اینصورت شبکه کریستالی نیمه‌رسانا بصورت شکل ۹-۱ درمی‌آید. با توجه در ملاحظه می‌شود چهار الکترون از الکترونهای لایه ظرفیت این فلز 5 ظرفیتی با الکترونهای ظرفیت اتمهای چهار ظرفیتی Si در محور خود پیوند کووالانسی تشکیل می‌دهند و طبیعتاً الکترون پنجم این عنصر نمی‌تواند در این پیوند شرکت داشته باشد در نتیجه تا درجه حرارت نسبتاً پایین تقریباً همه این الکترونها در حرکت حرارتی شرکت می‌کنند. انرژی لازم برای جدا کردن این الکترون از اتم بسیار کم و در حدود $0.05\ eV$ برای Si و $0.01\ eV$ برای Ge است.



شکل ۹-۱ : شبکه کریستال سیلیکن که در آن یک اتم سیلیکن با یک اتم 5 ظرفیتی (آنتیموان) جانگزین شده است.

چنین ناخالصی‌هایی که عامل شرکت الکترون‌ها) اضافی به شبکه کریستال می‌افزایند را اتمهای ناخالصی بخشنده یا نوع - n[5] می‌نامند.

در یک نیمه‌رسانای خالص با افزودن ناخالصی نوع n بخشنده نه تنها تعداد الکترون‌های آزاد افزوده می‌شود بلکه از غلظت حفره‌ها

---

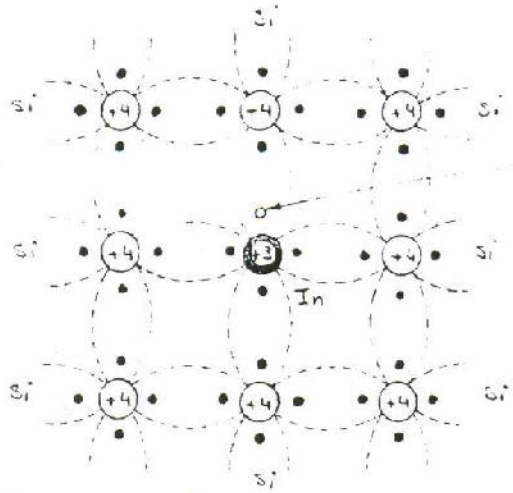
(۱) intrinsic concentration
(۲) doped semiconductor
(۳) doping
(۴) donor
(۵) n-type

* این اتمهای 5 ظرفیتی می‌توانند یکی از عناصر آنتیموان Sb - بیسموت Bi و یا آرسنیک As باشند.

نیز کاسته میشود. بطوری که تراکم حفره ها کمتر از تراکم ذاتی (n_i) میگردد. دلیل این امر اینست که افزایش تعداد الکترون ها باعث افزایش تعداد ترکیب مجدد شده و تعداد زیادی از الکترون ها با حفره ها مجدداً ترکیب گشته و غلظت حفره ها را کاهش می دهند.

انتمهای پذیرنده[1]

اگر اتمهای خالص افزوده شده به بلور یک عنصر سه ظرفیتی (نظیر بور Br، گالیم Ga، یا ایندیم In) باشد، در



شکل ۱۰-۱: شبکه بلوری سیلیکن که در آن یک اتم سیلیکن با یک اتم 3 ظرفیتی ایندیم جانگزین شده است.

خصلت تنها سه الکترون باند ظرفیت این عنصر با خالص با یک از اتمهای نیمه رسانای خالص تشکیل یک پیوند ظرفیتی خواهند داد، یعنی سه پیوند کووالانس توسط الکترونهای این اتم اشغال شده و در کنار یکی از پیوندهای چهارم یک حفره ای مشخص. این وضعیت در شکل ۱۰-۱ نشان داده شده است.

افزودن این نوع ناخالصی باعث افزایش حاملهای مثبت می شود، زیرا حفره ها یی بوجود آمده و می توانند الکترونهایی را بپذیرند. به این علت این نوع ناخالصی را پذیرنده یا ناخالصی نوع p[2] می نامند. افزودن مقدار کمی ناخالصی به نیمه رسانای خالص معمولا باعث آن خواهد شد که رسانایی آن بطور قابل توجهی افزایش می یابد. به عنوان مثال اگر یک ناخالصی نوع n به غلظت 10^8 به نیمه رسانای سیلیکن افزوده شود، رسانایی سیلیکن را در $30^{\circ}C$ ، 24100 برابر افزایش می دهد.

۵-۱ : جریان رانشی[3] و جریان انتشاری[4]

در نیمه رساناها دو نوع مکانیسم جریان وجود دارد: جریان رانشی و جریان انتشاری. جریان رانشی، حرکت باری است بر اثر اختلاف پتانسیل بوجود آمده بین دو نقطه را نشان می دهد. این جریانی است که در باتری ها نیز به علت اعمال ولتاژ به دو سر آن بوجود می آید.

در نیمه رساناها حرکت باری الکترونی می تواند بر اثر مکانیسم دیگری که انتشار[5] نامیده می شود نیز صورت گیرد. این مکانیسم جریان را در آن وجود دارد. جریان انتشاری بر اثر اختلاف پتانسیل بین دو سر عنصر به وجود نمی آید بلکه بر اثر حرکت ذاتی[6] ذرات باردار به واسطه انرژی حرارتی است. به عنوان مثال اگر در یک قسمت از نمونه، غلظت الکترونهای آزاد بیشتر از قسمت دیگر باشد، در اینصورت

---

(1) acceptor
(2) p-type
(3) drift current
(4) diffusion current
(5) diffusion
(6) random

www.tnar.ir

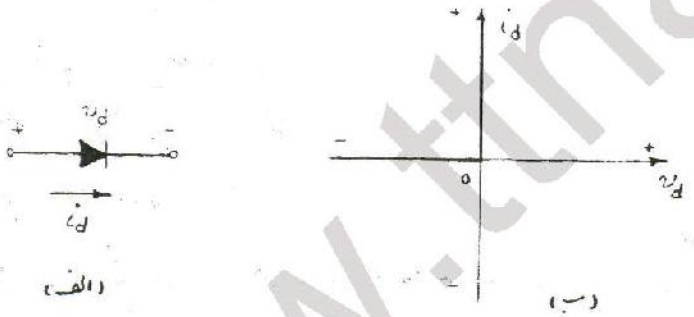
الکترون‌ها از ناحیه‌ای با تراکم بیشتر به ناحیه‌ای که در آن تراکم الکترون‌ها کمتر است حرکت می‌نمایند، تا توزیع تراکم حالت تعادل برقرار شود. این پدیده را انتشار می‌نامند.

پدیده‌ی انتشار کندتر از پدیده‌ی رانشی است، اما با افزایش دما بر حرکت حرارتی تأثیر چشمگیری می‌گذارد.

۱-۶ : دیود ایده‌آل

دیودهای نیمه‌هادی یکی از بلوک‌های اصلی تشکیل دهنده سیستم‌های الکترونیکی می‌باشند. این عنصر کاربردهای وسیعی در مدارهای مختلف هم از مدارهای ساده و پیچیده دارد. در این قسمت بررسی ساختمان و مشخصات مداری این عنصر مورد نظر ماست.

قبل از بررسی ساختمان و مشخصات یک دیود واقعی، ابتدا یک دیود ایده‌آل را مورد بررسی قرار می‌دهیم تا بعداً با مسائل مقایسه با دیود واقعی قرار گیرد. دیود ایده‌آل یک عنصر دوسر[1] است که عدم و مشخصه آن ترتیب در شکل الف ۱۱-۱ و ب ۱۱-۱ نشان داده شده است. با توجه به علامت‌های نشان داده شده در شکل ۱۱-۱ ملاحظه می‌شود که در حالت بایاس مثبت، ولتاژ دو سر دیود



شکل ۱۱-۱ : دیود ایده‌آل : الف) علامت ؛ ب) مشخصه.

صفر بوده، و در جریان داخل آن هر مقداری می‌تواند داشته باشد. در این حالت می‌توان مقاومت هادی دیود را به صورت زیر تعریف نمود :

$$R_f = \frac{V_f}{I_f} = \frac{0}{\text{هر مقدار مثبت}} = 0 \qquad (۱-۲)$$

در آن V_f و I_f ترتیب ولتاژ بایاس مستقیم[2] و جریان بایاس مستقیم دیود می‌باشند. بنابراین دیود ایده‌آل در حالت هدایت به صورت مدار اتصال کوتاه عمل می‌نماید.

حال با توجه به شکل ب ۱۱-۱ ملاحظه می‌شود که در حالت بایاس منفی جریان داخل دیود صفر است و ولتاژ دو سر آن هر مقدار منفی را می‌تواند داشته باشد. در این حالت مقاومت معکوس و یا قطع دیود را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود :

---

(۱) two - terminal

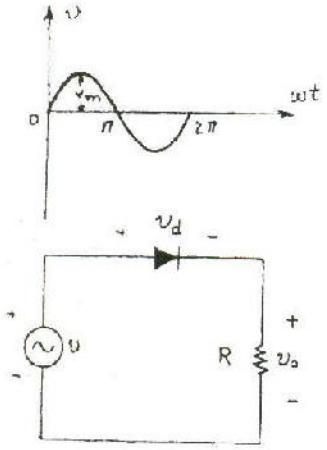
(۲) forward

www.ttnar.ir

$$R_r = \frac{V_r}{I_r} = \frac{\text{هر مقدار مثبت}}{0} \to \infty \qquad (۱-۳)$$

در دو سر دیود V_r ولتاژ معکوس و در سر دیود I_r جریان معکوس آن است . بنابراین دیود ایده‌آل در حالت قطع تقریباً مدار باز عمل می‌کند .

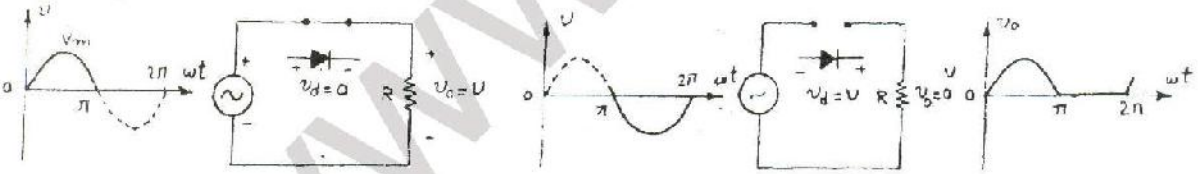
حال به عنوان مثال کاربرد یکسو کننده‌گی دیود را مورد بررسی قرار می‌دهیم . در مدار یکسو کننده ، ولتاژ ورودی متناوب است و دارای مقدار متوسط صفر است ، یکسو شده و دارای مقدار متوسط غیر صفر می‌شود . مدار یکسو کننده با یک دیود ایده‌آل در شکل ۱۲-۱ نشان داده شده است .



شکل ۱۲-۱ : مدار یکسو کننده‌ی ساده .

در فاصله‌ی 0 تا π از سیکل ورودی ، دامنه‌ی ولتاژ ورودی مثبت بوده و دیود هادی است می‌کند ، و در نتیجه مدار به صورت شکل الف ۱۳-۱ در می‌آید . در فاصله‌ی بین π تا 2π دامنه‌ی ولتاژ ورودی منفی بوده و در نتیجه دیود در حالت قطع می‌رود و مدار به حالت مدار شکل ب ۱۳-۱ در نظر گرفته می‌شود .

شکل سیگنال خروجی در شکل ج ۱۳-۱ رسم شده است . همانطور که ملاحظه می‌شود خروجی فقط دارای دامنه‌ی مثبت بوده و در نتیجه مقدار متوسط آن یک مقدار غیر صفر مثبت خواهد بود .



(الف) (ب) (ج)

شکل ۱۳-۱ : عملکرد یکسو کنندگی مدار شکل ۱۲-۱ .

۱-۷ : دیود نیمه‌هادی - پیوند pn [1]

یک دیود نیمه‌هادی از اتصال دو قطعه نیمه‌هادی P و n تشکیل می‌شود و پیوند pn نامیده می‌شود . حال به بررسی عملکرد یک پیوند pn پرداخته و مشخصه‌ی دیود را از آن نتیجه می‌گیریم .

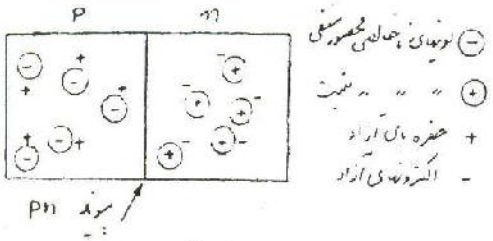
---

[1] pn Junction

www.tnar.ir

پیوند pn بدون اعمال ولتاژ خارجی

یک قطعه نیمه‌رسانا که یک طرف آن ناخالصی نوع P و در طرف دیگر آن نیمه‌رسانا از نوع n تزریق شده است را در نظر می‌گیریم. چنین ترکیبی را یک پیوند pn می‌نامند. یک پیوند pn را می‌توان توسط هم کنار هم قرار دادن دو قطعه P و n به یکدیگر ساخت، زیرا این عمل سبب ایجاد عدم پیوستگی (انفصال) در ساختمان کریستالی می‌شود. همانطور که قبلاً گفته شد عناصر نیمه‌رسانا را از نظر مسائل عملی باید از کریستالهای منفرد ساخت. ناخالصی‌ها افزوده شده به کریستال توسط روشهای گوناگون صورت می‌گیرد که از حوصله بحث خارج است.



شکل ۱۴-۱ : حاملهای آزاد یک نیمه‌رسانای ناخالصی شده قبل از تزریق شدن به طرفین آن.

شکل ۱۴-۱ یک پیوند pn نیمه‌رسانا را بطور دوبعدی نشان می‌دهد. در طرف P فقط حفره‌ها و یونهای منفرد ناخالصی و در طرف n فقط الکترونهای آزاد و یونهای مثبت ناخالصی‌ها نشان داده شده‌اند. یونها اتمهایی را نشان می‌دهند که می‌توانند الکترون دریافت کرده و یا آزاد کنند. یونها قادر به حرکت نبوده و فقط توسط نیروهای شبکه در جای خود نگاه داشته شده‌اند. تمام نمونه از نظر الکتریکی خنثی بوده و بنابراین به تعداد یونهای مثبت الکترونهای آزاد و به تعداد یونهای منفرد حفره در نمونه وجود دارد.

هنگامیکه پیوند pn تشکیل می‌شود مراحل زیر اتفاق می‌افتد:

۱. حفره‌ها از طرف P به طرف n سرازیر گشته و در آنجا با الکترونهای آزاد ترکیب (بهم) می‌شوند.

۲. الکترونهای آزاد از طرف n به طرف P سرازیر شده و در آنجا با حفره‌ها ترکیب (بهم) می‌شوند.

۳. اثر با الکترونهای آزاد و حفره به طرفین پیوند سبب ایجاد یک جریان الکتریکی شده که بصورت جریان ترکیب مجدد[1] شناخته می‌شود. علت ترکیب مجدد بصورت اولیه بارهای ناخالصه از پیوند، از بین می‌روند. بیشتر این ترکیب مجدد بلافاصله بعد از تشکیل پیوند و در ناحیه‌ای بسیار نزدیک به پیوند صورت می‌گیرد.

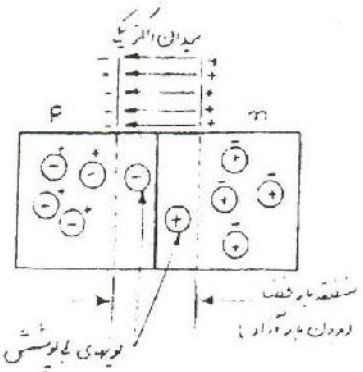
۴. در طرف n نیمه‌رسانا، الکترون از دست رفته و حفره‌ها افزوده می‌شوند؛ بهمین ترتیب در طرف P، حفره‌ها کم شده و الکترونها زیاد می‌گردند. این تغییرات بار فقط در ناحیه‌ای کوچک از طرفین پیوند صورت می‌گیرد بطوریکه این نواحی از حاملهای آزاد الکتریکی تخلیه گشته و در طرف n باریهای مثبت و در طرف P بارهای منفی تجمع می‌نمایند. این ناحیه یا ناحیه بار فضا[2] یا ناحیه‌ی تخلیه[3] و یا ناحیه‌ی گذار[4] می‌نامند. چون در طرف n الکترونها کم می‌شوند لذا یونهای مثبت آنان ظاهر شده و بهمین ترتیب باکم شدن حفره‌ها

---

(1) recombination current
(2) space-charge region
(3) deplation region
(4) transition region

در طرف P ، لایه‌های منفرد در این قسمت لوجه خواهند آمد (شکل ۱۵-۱) .

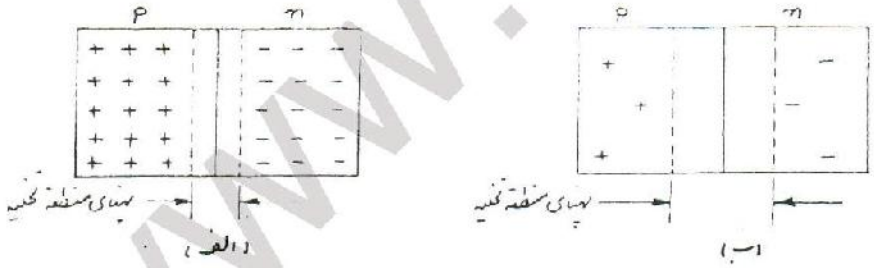
۵ . لایه‌هایی که در طرفین پیوند pn به این ترتیب ایجاد می‌شوند نظیر شکل ۱۵-۱ کم میدان الکتریکی لوجه می‌آورند . میدان الکتریکی حاصل کم اختلاف پتانسیل بین دو ناحیه را نشان می‌دهد در حالی که سد پتانسیل[1] در مقابل عبور بار می‌باشد .



شکل ۱۵-۱ : ایجاد میدان الکتریکی در پیوند pn بعلت وجود لایه‌های یا پوشش در این ناحیه.

۶ . پتانسیل بار فضا[2] یا حاصل سد پتانسیل در منطقه‌ی پیوند از انتشار بیشتر حاملهای الکتریکی به طرفین پیوند جلوگیری می‌کند . به عنوان مثال ، الکترونها در سمت n به طرف ناحیه P حرکت کنند ، الکترونها در سمت P تحت تاثیر نیروی رانده قرار می‌گیرند . همچنین نیروی نظیر همین نیرو از حرکت حفره‌ها به سمت n جلوگیری می‌نماید . تنها بارهایی که دارای انرژی بیشتر از سد پتانسیل محدود شده و در یک حد تعادل می‌رسند .

۷ . پهنای منطقه‌ی تخلیه بستگی به مقدار بارهای تزریق شده در نواحی P و n دارد . اگر تراکم بارهای تزریقی در این نواحی خیلی زیاد باشد ، از نظر فیزیکی منطقه تخلیه خیلی نازک خواهد شد ، زیرا بار منتشر شده به طرف مقابل پیوند بعلت ترکیب مجدد سریع بارهای اکثریت طرف مقابل مانعی به طور سریع طولانی نخواهد داشت . اگر مقدار تزریق کم باشد در این صورت بعلت کند بودن ترکیب مجدد ، پهنای منطقه تخلیه افزایش خواهد یافت . شکل ۱۶-۱ پهنای منطقه تخلیه را برای دو نوع تزریق زیاد و کم نشان می‌دهد . در شکل دارای پهنای



شکل ۱۶-۱ : دو الگوی پهنای منطقه تخلیه به مقدار تزریق ناخالصی (برای سادگی فقط بارهای آزاد نشان داده شده است) ؛ الف) تزریق زیاد ؛ ب) تزریق کم .

منطقه تخلیه غرق شده و در عمر پهنای این ناحیه در حدود 10^{-6} cm و یا کمتر است .

تاکنون فقط بحث در مورد الکترونهای آزاد طرف n و حفره‌ی طرف P انجام شد . الکترونهای آزاد طرف n و حفره‌های آزاد طرف P را حاملهای اکثریت[3] می‌نامند .

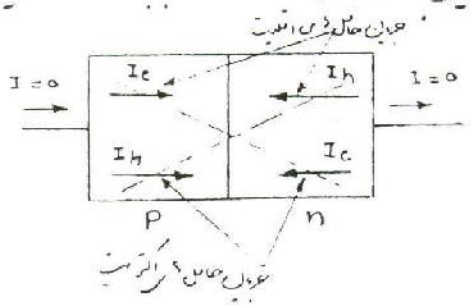
---

(1) potential barrier
(2) space charge potential
(3) majority carrier

www.itnar.ir

حال به بررسی حامل‌های اقلیت[1] می‌پردازیم. به‌علت وجود حرارت یا عوامل انرژی‌زای دیگر، تعدادی از پیوندهای کووالانس دائماً شکسته می‌شوند. هنگامی که یک پیوند کووالانس می‌شکند، دو نوع حامل یعنی الکترون و حفره ایجاد می‌شود. به‌عنوان مثال، در یک نیمه‌رسانای نوع n تعداد زیادی از الکترون‌های آزاد به‌علت ترکیب ناخالصی وجود دارند و تعدادی نیز از الکترون‌ها و حفره‌های به‌علت شکسته شدن پیوندهای کووالانس در آن به وجود می‌آیند. در این نوع نیمه‌رسانا، الکترون‌ها حامل‌های اکثریت و حفره‌ها حامل‌های اقلیت می‌باشند.

هنگام تشکیل پیوند در یک پیوند pn، یک جریان ترکیب مجدد به وجود آمده و به‌علت عبور حامل‌های اکثریت از پیوند می‌گذرد. جهت میدان الکتریکی به وجود آمده در پیوند مانع عبور بیشتر این حامل‌ها از منطقه پیوند می‌شود. اما به‌علت اینکه این میدان الکتریکی نیروی به حامل‌های اقلیت (الکترون در نوع p و حفره در نوع n) وارد می‌کند، لذا یک جریان حامل‌ها گذر می‌نماید تا از پیوند عبور نمایند. هر بار که یک حامل اقلیت از پیوند عبور می‌کند، سد پتانسیل پیوند کاهش یافته و در نتیجه جریان انتشاری بیشتری از حامل‌های اکثریت به منطقه پیوند سرازیر شده و دوباره سد پتانسیل را افزایش می‌دهند. این عمل را تا آخر ادامه می‌یابد. زمانی که یک حالت تعادل به وجود آمده و در این حالت جریان انتشاری حامل‌های اکثریت با جریان رانشی حامل‌های اقلیت از نظر مقدار یکسان شده و جهت آنها مخالف هم می‌شود و در نتیجه کل جریان در پیوند صفر می‌گردد (شکل ۱-۱۷).

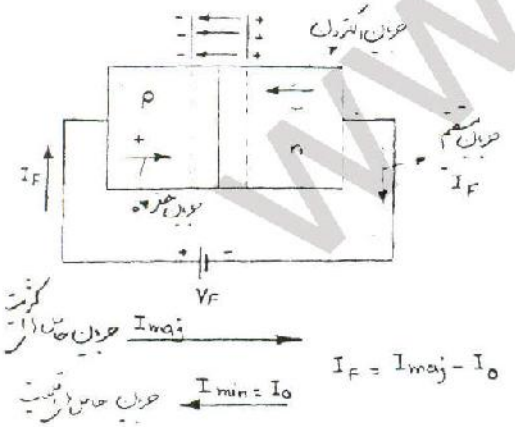


شکل ۱-۱۷ : جریان حامل‌ها در پیوند pn در حالت بایاس خارجی.

تولید حامل‌های اقلیت فقط تابع درجه حرارت می‌باشد و از نظر عملی یک سطح حدی برای عناصر Si و Ge در درجه حرارت‌های بالاتر کار می‌کنند وجود می‌آورند. البته این مسأله برای Si کمتر از Ge اهمیت دارد زیرا انرژی باند ممنوع در سیلیکون کمتر از ژرمانیم می‌باشد.

پیوند pn بایاس شده در جهت مستقیم[2]

حال فرض می‌کنیم در پیوند pn در شکل ۱-۱۸ به یک منبع ولتاژ خارجی متصل کنیم به‌طوری که قسمت p آن به قطب مثبت و قسمت n آن به قطب منفی باتری وصل شده باشد. در این حالت گوئیم در پیوند pn در جهت مستقیم بایاس شده است. بایاس‌دهی ولتاژ اعمال شده باعث می‌شود در الکترون‌های آزاد و حفره‌ها در جهت نشان داده شده از پیوند عبور کنند. این حامل‌ها لوله‌های پوشیده نشده در منطقه تهی



شکل ۱-۱۸ : پیوند pn در حالت بایاس مستقیم.

(1) minority carriers

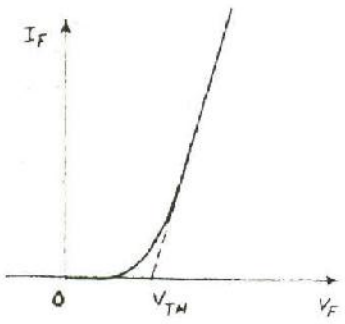
(2) forward bias

www.ttnar.ir

پیوند را وسیع نموده و در نتیجه مقاومت پتانسیل را کاهش می‌دهند. حال عبور از مقاومت پتانسیل برای حامل‌های الکترونیک ساده‌تر شده و این حامل‌ها به راحتی می‌توانند در منطقه پیوند انتشار یابند (چون انرژی آنها به اندازه‌ای است که می‌توانند از این منطقه عبور نمایند). اگر ولتاژ V_F را بیشتر افزایش دهیم، در نتیجه کاهش مقاومت پتانسیل بیشتر شده و در نتیجه مقاومت مؤثر پیوند با افزایش ولتاژ کمتر می‌شود. این عمل سبب عبور بیشتر حامل‌های الکترونیک از منطقه پیوند خواهد شد. عبور این حامل‌ها در شکل ۱۸-۱ توسط جریان I_F نشان داده شده که متشکل از جریان حفره و الکترون خواهد بود. چون در سمت راست حفره موجود نیست لذا جریان در مدار خارجی تنها توسط الکترون است.

عبور جریان از نیمه‌ی p در منطقه پیوند سبب افزایش دو چندان آن می‌شود. اگر بایاس مستقیم را باز افزایش دهیم در نتیجه جریان ممکن است بیش از حد افزایش یافته و موجب گرم شدن بیش از حد پیوند گشته و نیمه‌ی p را سوزاند. عنصر Ge معمولاً تا درجه حرارت $100^{\circ}C$ و سیلیکن تا درجه حرارت $175^{\circ}C$ یا بالاتر تاب استقامت دارد.

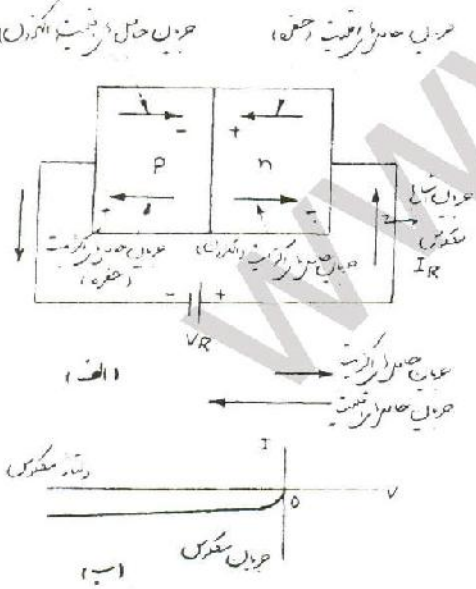
اگر جریان و ولتاژ مستقیم دیود اندازه‌گیری شود، در نتیجه مشاهده می‌شود که تقریباً با لغاز 0.7 ولت جریان دیود وجود دارد (شکل ۱۹-۱). نظر به ملاحظه مشخصه جریان - ولتاژ دیود، با افزایش ولتاژ کمتر از یک ولتاژ مشخص در ولتاژ آستانه یا قطع (V_{TH}) ناحیه مشخصه مقدار ناچیزی است و مقدار آن با افزایش ولتاژ بالاتر از این حد سریعاً افزایش می‌یابد. ولتاژ آستانه برای دیودهای Ge در حدود 0.3^{V}، و برای Si در حدود 0.7^{V} است.



شکل ۱۹-۱ : مشخصه ولت - آمپر پیوند pn در جهت بایس مستقیم.

پیوند pn بایاس شده در جهت معکوس[1]

حال فرض کنید در یک پیوند pn نظیر شکل ۲۰-۱ الف معکوس بایاس شده باشد. در این حالت قسمت p به قطب منفی و قسمت n به قطب مثبت باتری وصل می‌شود. در نتیجه سد پتانسیل افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر V_R، سد پتانسیل نیز زیادتر شده و عبور حامل‌های الکترونیک از منطقه‌ی پیوند دشوارتر خواهد شد. در حقیقت در این حالت حامل‌های الکترونیک از منطقه پیوند رانده شده و این سبب عبور جریان بسیار کمی از دیود گشته و بنابراین پیوند در این صورت یک مقاومت خیلی زیاد از خود نشان خواهد داد.



شکل ۲۰-۱ : الف) پیوند pn با بایس معکوس؛ ب) مشخصه ولت - آمپر دیود با بایس معکوس.

ملاحظه می‌شود که علاوه بر حامل‌های اکثریت، در دیود pn حامل‌های اقلیت

(1) Reverse bias

www.tmar.ir

نیز وجود دارند که ولتاژ معکوس تأثیر روی آنها نخواهد داشت (وجود آنها فقط مربوط به درجه حرارت است) و این باعث میشود که در دیود حقیقی معکوس جریان کمی وجود داشته باشد که جریان اشباع معکوس[1] نامیده میشود .

مشخصه ولت - آمپر دیود حقیقی در شکل ب ۲۰-۱ نشان داده شده است . ملاحظه میشود که با افزایش ولتاژ معکوس ، جریان دیود نیز به طور کم افزایش خواهد یافت . این بعلت وجود مقاومتی روی سطح نیمه‌هادی است که در نظر گرفته میشود همراه با مقاومت اهمی تماس فلز با نیمه‌هادی[2] نامیده میشود .

جریان اشباع معکوس تابع درجه حرارت میباشد . از نظر تئوری به ازای افزایش یک درجه حرارت ، I_0 برای سیلیکن ۸٪ و برای ژرمانیم ۱۱٪ افزایش مییابد . تطبیق داده‌های عملی (جدول) با این مقدار بصورت تقریبی است . بعلت اینکه برای دیود حقیقی ، همراه جریان اشباع معکوس ، یک مولفه جریان پراکندگی وجود دارد ، بنابراین نتایج تجربی نشان میدهد که به ازای افزایش هر درجه حرارت برای هر دو دیود سیلیکن و ژرمانیم ، I_0 به اندازه ۷٪ افزایش مییابد . چون $(1.07)^{10} \cong 2.0$ است بنابراین نتیجه میشود که جریان اشباع معکوس به ازای افزایش هر ده درجه‌ی حرارت دو برابر می‌شود .

۱-۸ : مشخصه ی ولت - آمپر دیود

با استفاده از تئوری فیزیک نیمه‌هادی ، میتوان رابطه جریان و ولتاژ یک پیوند pn را بصورت زیر نوشت :

$$I = I_0 \left(e^{V/\eta V_T} - 1 \right) \qquad (1-4)$$

در آن $V_T = \frac{kT}{q}$ است طوری که :

I_0 : جریان اشباع معکوس

k : ضریب بولتزمن[3] ($k = 1.38 \times 10^{-23}$ Joul/°k)

q : بار الکتریکی الکترون ($q = 1.6 \times 10^{-19}$ Coul.)

I : جریان دیود

V : ولتاژ دو سر پیوند

η : عددی که بین ۱ و ۲ واقع است .

با توجه به مقادیر k و q مقدار V_T برابر $\frac{T}{11600}$ بوده و به ازای درجه حرارت معمولی ($300^{\circ}k$) مقدار آن 26^{mv} میشود .

---

(۱) reverse saturation current

(۲) surface leakage current

(۳) Boltzmann constant

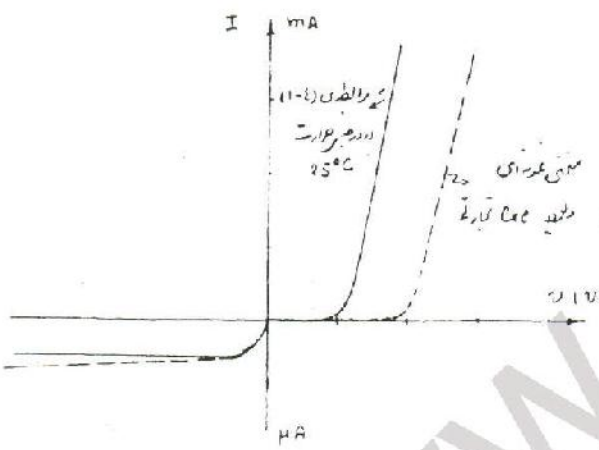
www.tnar.ir

معمولاً محدوده جریانهای مستقیم دیود قسمتی است که در آن، جریان بیش از چندین برابر جریان اشباع معکوس کار می‌کند. برای نشان دادن مشخصه مستقیم دیود بطور مناسب، لازم است که مقیاس آن در قسمت با جهه نگار متفاوت باشد (نظیر شکل ب ۲۱-۱). در مشخصه ولت - آمپر شکل ب ۲۱-۱ مقیاس جریان مستقیم دیود mA و جریان معکوس آن μA است.

با توجه به شکل ب ۱۷-۱ ملاحظه می‌شود که در ولتاژ معکوس V_Z جریان دیود بطور ناگهانی افزایش یافته و دیگر از رابطه‌ی (۴-۱) تبعیت نمی‌کند [قسمت منحنی نقطه چین منحنی]. در این ولتاژ معکوس، جریان معکوس دیود خیلی زیاد شده و در این حالت دیود در ناحیه‌ی شکست[1] قرار می‌گیرد. از قسمت بعد در مورد شکست دیود بحث خواهد شد.

مشخصه‌ی واقعی دیود

مشخصه واقعی دیود با تجارب به علت چندین پدیده، منحنی ۲ یا در حالت متوسط رابطه‌ی (۴-۱) است مراد، تفاوت دارد. در شکل ۲۲-۱ این مشخصه برای دیود ژرمانیم رسم شده است. منحنی خط چین مشخصه ولت - آمپر یک دیود ژرمانیم ایده‌آل را نشان می‌دهد. بطوری که ملاحظه می‌شود این منحنی نسبت به مشخصه رسم شده از روی رابطه‌ی (۴-۱) قدری به طرف راست انتقال یافته است. این انتقال به علت وجود مقاومت بدنه‌ی نیمه هادی و مقاومت اتصالات دیود به سیم‌ها[2] رابطه می‌باشد. این مقاومت باعث عدم انطباق منحنی مشخصه و مقدار تئوری آن خواهد شد. بعبارت تکنیکی ساخت نیمه‌هادی این منحنی به طرف منحنی اصلی (رابطه‌ی ۴-۱) انتقال خواهد یافت. در ناحیه‌ی بایاس معکوس نیز به علت وجود جریان نشتی سطحی مقاومت معکوس دیود کاهش می‌یابد.



شکل ۲۲-۱ : مقایسه مشخصه‌ی واقعی دیود با مشخصه‌ی ایده‌آل تئوری.

منطقه شکست

همانطوری که قبلاً گفته شد هنگامیکه ولتاژ معکوس دیود افزایش می‌یابد، در بعضی موارد در یک ولتاژ معکوس خاص، مقدار جریان دیود بطور ناگهانی افزایش می‌یابد. این پدیده در چند قسمت مختلف دیود اتفاق می‌افتد که شکست می‌نامند (شکل ب ۲۱-۱). این پدیده در ولتاژهای معکوس زیاد مشاهده می‌شود. هنگامیکه ولتاژ معکوس دیود رفته رفته افزایش می‌یابد در یک ولتاژ خاص حامل‌های اقلیت انرژی و سرعت کافی از میدان الکتریکی دریافت نموده و در اثر برخورد با اتمهای کریستال پیوند کووالانسی را شکسته و حامل‌های جدیدی را ایجاد می‌کنند. این حامل‌های جدید نیز تحت تأثیر میدان الکتریکی انرژی کافی بدست آورده و قادر به شکستن پیوندهای دیگر خواهند شد.

---

(1) breakdown region

(2) bulk resistance

www.tmar.ir

در رابطه (۱-٤) مقدار مثبت I نشان دهنده جهت رانش حرکت جریان در دیود از P به n است . ولتاژ دیود در صورتی که به طور مستقیم بایس شده باشد ، مقدار مثبت نشان داده می شود [یعنی P نسبت به n مثبت تر است] . η برای ژرمانیم برابر ۲ و برای سیلیکن در جریانهای کم $\eta=2$ و در جریانهای زیاد $\eta=1$ خواهد بود .

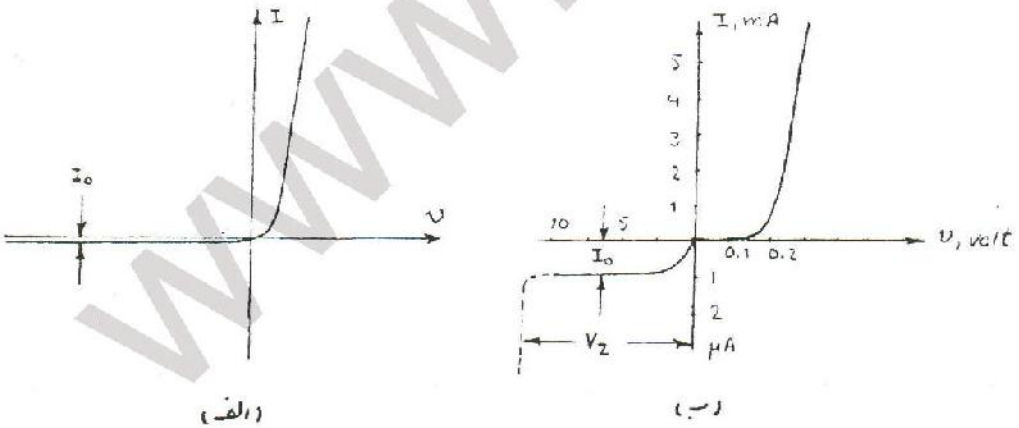
شکل الف۲۱-۱ شکل مشخصه بیان شده توسط رابطه (۱-٤) را نشان می دهد . ملاحظه می شود در ولتاژهای مثبت در حدود V_T هستند ، مقدار جمله دوم خیلی بیشتر از واحد است و بنابراین از یک می توان در مقابل آن چشم پوشی نمود و رابطه (۱-٤) را به صورت زیر نوشت :

$$I = I_0 e^{V/\eta V_T} \qquad (۱-۵)$$

طبق رابطه (۱-۵) بجز محدوده کوچکی در نزدیکی مبدأ ، جریان به صورت نمایی با ولتاژ تغییر می کند . هنگامی که دیود به صورت معکوس بایس شود ، و مقدار $|V|$ چندین برابر V_T باشد در این صورت از جمله دوم می توان در مقابل یک صرف نظر کرد و رابطه (۱-٤) به صورت زیر نوشت :

$$I = -I_0 \qquad (۱-۶)$$

بنابراین جریان معکوس ثابت بوده و به بایس اعمال شده وابسته نخواهد بود . همین جهت I_0 را جریان اشباع معکوس می نامند .



(الف) (ب)

شکل ۲۱-۱ : الف) مشخصه ولت - آمپر دیود ؛ ب) مشخصه ولت - آمپر دیود با در مقیاس متفاوت برای حالت مستقیم و معکوس آن .

توجه نشان دادن تغییرات I در بایس معکوس قسمت منفی جریان ، و ولتاژ در مشخصه ولت - آمپر با مقیاس نزدیکتری رسم شده است .

www.ttnar.ir

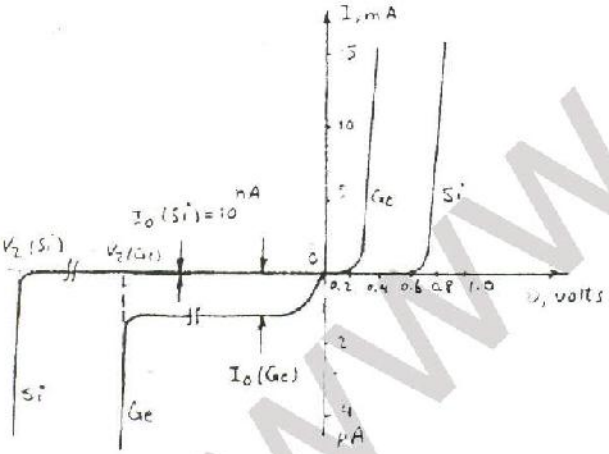
این پدیده سبب ایجاد یک جریان بهمنی می‌شود. بهمن متناسب این ناحیه را ناحیه‌ی شکست بهمنی[1] می‌نامند.

با زیاد کردن توأم حاصل‌ضرب P و n یعنی با بالا بردن سطح تزریق ناخالصی به نیمه‌رسانا، ولتاژ شکست به مقدار معینی (مقدار جریان) تزریق می‌شود. در ولتاژهای پایین V_Z نظیر 5^V -، مکانیسم دیگری در شکست زنر[2] نامیده می‌شود در پدیده شکست موثر می‌گردد. این نوع شکست به علت ایجاد میدان زیاد در ناحیه پیوند که باعث شکستن پیوندهای کووالانسی شده و حامل‌های جدید تولید می‌کند، اتفاق می‌افتد. گرچه مکانیسم زنر فقط در ولتاژهای پایین V_Z اتفاق می‌افتد، ولی این ناحیه را تقریباً کلیه ناحیه‌ی زنر نامیده و دیود‌هایی را که در آن از این خاصیت استفاده می‌شود، دیود زنر[3] می‌نامند. این نوع دیود‌ها در کارهای آینده تحت عنوان تنظیم‌کننده ولتاژ بحث خواهد شد.

در کارهایی که دیود از دیود به عنوان یکسوکننده استفاده می‌شود، باید دقت کرد که در دیود وارد ناحیه‌ی شکست نشود. مقدار حداکثر ولتاژ بایاس معکوس را که می‌توان به دیود اعمال کرد (بدون اینکه به چنین منطقه‌ای وارد شود) ولتاژ ماکزیمم معکوس[4] نامیده و با علامت اختصاری PIV نشان می‌دهند.

مشخصات دیودهای سیلیکن و ژرمانیم

همانطور که قبلاً گفته شد نیمه‌رساناهای ژرمانیم و سیلیکن دو نیمه‌رسانایی هستند که در ساخت دیودهای مورد استفاده قرار می‌گیرند. بین این دو نوع دیود تفاوتهایی وجود دارد. شکل ۲۳-۱ مشخصه‌های ولت-آمپر دو دیود سیلیکن و ژرمانیم را نشان می‌دهد.



شکل ۲۳-۱ : مشخصه‌های ولت-آمپر دیودهای سیلیکن و ژرمانیم.

اغلب کلیه دیودهای سیلیکن دارای PIV و محدوده جریان بیشتری از دیودهای ژرمانیم بوده و محدوده حرارتی کارآن از دیود سیلیکن استفاده می‌شود بیشتر از دیود ژرمانیم است. محدوده‌ی PIV دیود سیلیکن می‌تواند در حدود 1000^V باشد در حالی که محدوده برای دیود ژرمانیم در حدود 400^V است. دیودهای سیلیکن را می‌توان تا درجه حرارت‌های در حدود $200^{\circ}C$ نگاه داشت. محدوده‌ی حرارتی دیودهای ژرمانیم حداکثر تا حدود $100^{\circ}C$ می‌باشد.

عیب اساسی دیود سیلیکن در مقایسه با دیود ژرمانیم داشتن ولتاژ آغاز هدایت (ولتاژ آستانه‌ی) بیشتر نسبت به آن دیود است. نظیر آنچه در شکل ۲۳-۱ ملاحظه می‌شود، این ولتاژ برای دیود سیلیکن در حدود 0.7^V و برای دیود ژرمانیم در حدود 0.3^V است. زیاد بودن ولتاژ آغاز هدایت دیود سیلیکن به این علت است که برای این دیود در جریانهای کم، η برابر 2 بوده و با افزایش جریان مقدار آن

---

(1) avalanche breakdown
(2) Zener breakdown
(3) Zener diode
(4) peak Inverse Voltage

www.tnar.ir

به ۱ نقصان می‌یابد . ولتاژی که در آن جریان دیود شروع به افزایش می‌یابد و تخمین خیلی دقیق از اهمیت خاصی برخوردار بوده و با علامت V_γ نشان داده می‌شود . بنابراین داریم :

$$V_\gamma = 0.7^{V} \qquad Si$$

$$V_\gamma = 0.3^{V} \qquad Ge$$

واضح است هرچه تخلیه به محور عمودی نزدیکتر شود ، مقاومت حالت هدایت کمتر می‌شود . در هر حال سایر مشخصات دیود سیلیکن در مقایسه با دیود ژرمانیم ثابت شده است که این دیود (سیلیکن) از اهمیت خاصی از نظر کاربردهای برخوردار باشد .

جریان اشباع معکوس دیود ژرمانیم در حدود μA و دیود سیلیکن در حدود nA است . علاوه بر مطالب گفته شده ، دیود سیلیکن در مقابل جریان شوک و تغییرات محیط بسیار مقاوم‌تر است و اثر گذشت زمان ، رطوبت و حرارت تأثیر زیادی بر مشخصاتش ندارد .

★ ۹-۱ : خازنهای انتشاری[1] و بار فضای[2] دیود

مشخصات عناصر الکترونیکی نسبت به فرکانس حساس می‌باشد . در این عناصر معمولاً خازن متعادلی بین ترمینالهای مختلف آن وجود دارد که واکنش این خازن‌ها در فرکانس‌های پایین مقدار خیلی زیادی نیست و در نتیجه از اثر آنها می‌توان در این فرکانس‌ها صرف نظر نمود . با بالا رفتن فرکانس واکنش این خازن‌ها کم شده و در نتیجه در مشخصه فرکانس بالا عنصر ظاهر می‌شوند . در دیود نیمه‌هادی PN اثر دو نوع خازن را می‌توان در نظر گرفت . در هر دو ناحیه بایس دیود ، هر دو خازن وجود دارند ولی در هر یک از این دو حالت یکی از خازنها تأثیر بیشتری دارد بنابراین برای هرکدام از این دو حالت فقط یک خازن متعادل در نظر گرفته می‌شود . خازن متعادل در ناحیه بایس معکوس را خازن بار فضا یا خازن گذار[3] (C_T) می‌نامند . همچنین خازن متعادل ناحیه بایس مستقیم خازن انتشاری[4] (C_D) یا خازن ذخیره‌ای نامیده می‌شود .

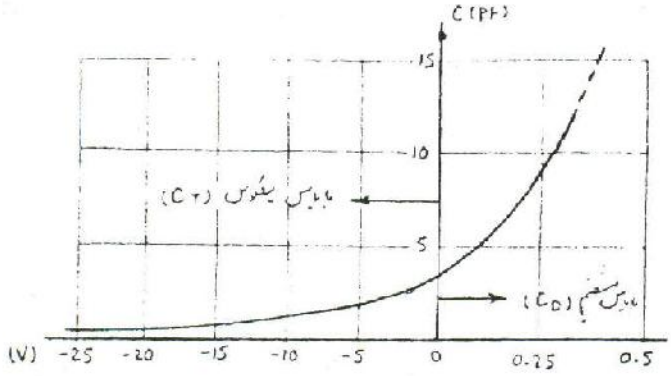
باید خاطرنشان کرد که برای خازن‌های دیگر دارای صفحات موازی می‌باشد ظرفیت را می‌توان از رابطه $C = \varepsilon A/d$ بدست آورد که در آن ε ضریب گذردهی الکتریکی[5] عایق بین صفحات ، A سطح صفحات و d فاصله بین آنهاست . در ناحیه بایس معکوس در یک ناحیه بار فضا و ناحیه‌ای تهی از بار آزاد وجود دارد ، این قسمت را می‌توان نظیر یک عایق بین لایه‌های بار فضا در نظر گرفت . همچنین با افزایش پتانسیل معکوس دو سر دیود ، عرض ناحیه بار فضا زیاد می‌شود ، بنابراین در نتیجه مقدار خازن بار فضا کاهش می‌یابد . تغییرات ظرفیت خازن بار فضا برحسب ولتاژ دو سر آن در شکل ۲۴-۱ نشان داده شده است . واضح است مقدار خازن دیود به مقدار ولتاژ دو سر آن در هر جزء از سیستم‌های الکترونیکی کاربرد خاص دارد .

---

(1) diffusion capacitance
(2) Space-charge capacitance
(3) Transition capacitance
(4) diffusion (Storage) capacitance
(5) permittivity

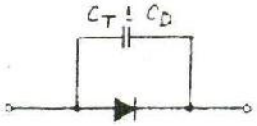
www.tinar.ir

در ناحیه‌ی بایس مستقیم خازن دیفوزی حائز اهمیت است. در اثر آن ضخامت تهی از حاملان باردهنده‌ی دیود زیاد می‌شود. این خازن بر اثر تغییر ولتاژ الکتریکی طرفین پیوند و حسب تغییر ولتاژ بایس مستقیم دیود این دو مشخصه عمل می‌کند. هنگامی که ولتاژ بایس مستقیم دیود تغییر می‌کند تراکم حفره‌ها در لبه‌ی ناحیه‌ی n پیوند و همچنین تراکم الکترون‌ها در لبه‌ی ناحیه‌ی p در آن تغییر می‌کند. چون در این حالت مقدار بار با تغییر ولتاژ اعمال شده در دو سر دیود تغییر می‌کند، بنابراین این تغییر بار که خازن را نشان می‌دهد در همان خازن انتشار می‌باشد. ثابت بودن مشخصه در مقدار این خازن متناسب با جریان دیود است. یعنی با افزایش جریان دیود مقدار این خازن نیز اضافه می‌شود. این امر ثابت زمانی دیود ($\tau = RC$) را که از پارامترهای مهم در سوئیچینگ دیود است، زیاد کرده، افزایش می‌دهد.



شکل ۲۴-۱ : خازن‌های بارفضا و انتشاری دیود برحسب ولتاژ بایس (دیود سیلیکن).

خازن‌های متعادل دیود را می‌توان بصورت یک خازن موازی با دیود در نظر گرفت (شکل ۲۵-۱). برای فرکانس‌های بالا و متوسط، اتصال این خازن اثر زمان دیود را متوسط می‌کند و آنرا حذف نمود.



شکل ۲۵-۱ : مدار متعادل دیود با در نظر گرفتن اثر خازنهای انتشاری و بارفضا.

۱۰-۱ : اثر درجه حرارت در دیود

درجه حرارت یکی از مهمترین پارامترها در تجزیه تحلیل و طراحی سیستم‌های الکترونیکی است. این عامل در مشخصه‌ی ۳ عنصر نیمه‌هادی دیود، ترانزیستور و ... می‌باشد. در شکل ۲۶-۱ تغییرات مشخصه ولت آمپر یک دیود نیمه‌هادی در اثر تغییرات درجه حرارت نشان داده شده است. طوری که ملاحظه می‌شود افزایش درجه حرارت باعث انتقال مشخصه به سمت چپ (در طرف محور جریان) در ناحیه‌ی بایس مستقیم شده، و جریان اشباع معکوس دیود را افزایش می‌دهد. همچنین تغییر درجه حرارت باعث تغییر ولتاژ شکست دیود می‌شود.

گرما خود[1]

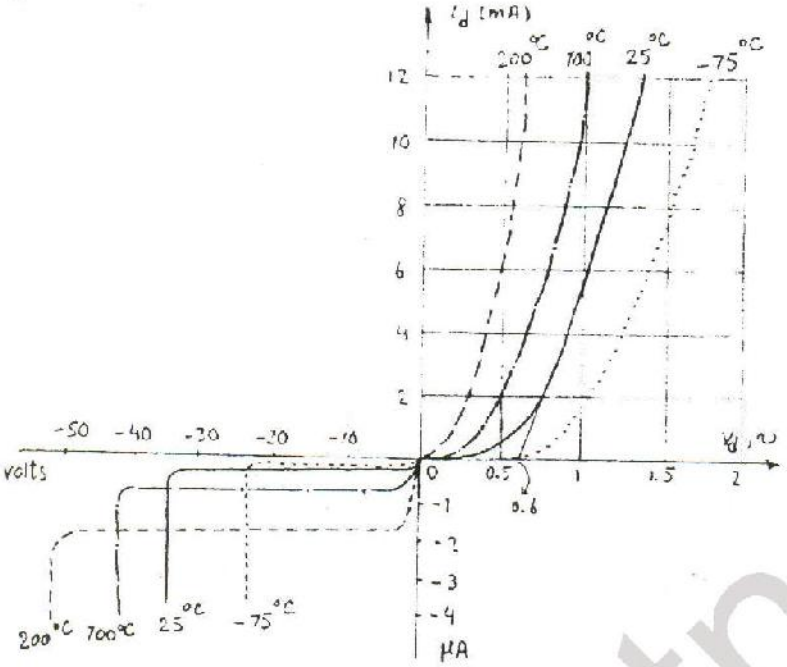
با افزایش جریان در داخل دیود و یا هر نیمه‌هادی دیگر، درجه حرارت آن بالا می‌رود. معمولاً پیوند pn تا درجه حرارت مشخصی

---

(1) heatsink

www.tinari.ir

تا وقتی که کم باشد و اگر درجه حرارت از حد مشخصی تاوند نباید ممکن است بیشتر آسیب برسد . این درجه حرارت برای دیودهای ژرمانیم بین $75^{\circ}C$ تا $100^{\circ}C$ و برای دیودهای سیلیکن بین $150^{\circ}C$ تا $200^{\circ}C$ است .

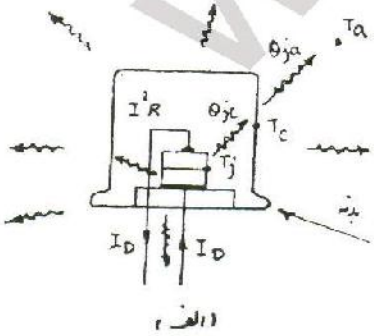


شکل ۲۶-۱ : تغییر مشخصه دیود بر اثر تغییر درجه حرارت .

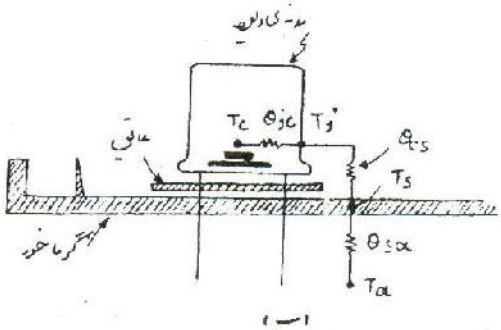
هنگامی که دیود تحت تاثیر هیچ ولتاژی قرار نگیرد ، درجه حرارت پیوند آن با درجه حرارت محیط برابر خواهد بود . درجه حرارت محیط با T_a نشان داده شده در حسب درجه سانتی گراد بیان میشود .

هنگامی که دیود را با پیش ولتاژ عبور جریان در راستای آن باعث تلف توان RI^2 در داخل پیوند شده و درجه حرارت آنرا افزایش میدهد . در نتیجه حرارت پیوند بالاتر از طریق آن به محیط اطراف منتقل میشود (شکل الف ۲۷-۱) .

برای اینکه انتقال این حرارت به محیط هرچه بهتر صورت گیرد معمولاً دیود را روی یک سطح فلزی نصب میکنند . هرچه سطح این فلز بزرگتر باشد انتشار حرارت از طریق آن به محیط اطراف بهتر صورت میگیرد و این عمل باعث میشود که حرارت پیوند بهتر به محیط منتقل شده و بتوان از دیود در توانهای بالاتر استفاده نمود . این سطح فلزی را اصطلاحاً گرماخور میگویند (شکل ب ۲۷-۱) . معمولاً برای اتصال کلکتر دیود از گرماخور طبق شکل ب ۲۷-۱ بین آن و دیود ورقه نازک میکا (نظایر میکا) قرار داده میشود .



(الف)



(ب)

شکل ۲۷-۱ : مسیر هدایت حرارت دیود : الف) بدون گرماخور ؛ ب) با گرماخور .

www.tnar.ir

اگر توان تلف شده در پیوند ثابت بوده و در محدوده‌ی قابلیت تلف توان[1] دایود باشد، در این صورت همه‌ی جریان از آن، برای مدتی به سیستم بصورت تعادل حرارتی می‌رسد. در این صورت هرکدام از قسمتهای مختلف تشریح شده دارای درجه حرارتهای مختلف خواهند بود. با کمی تقریب خوب می‌توان افزایش درجه حرارت را متناسب با توان تلف شده توسط پیوند دانست. ضریب این تناسب، مقاومت حرارتی[2] نامیده شده و با علامت θ مشخص می‌شود.

اختلاف درجه حرارت پیوند و درجه حرارت بدنه‌ی دایود - توان تلف شده در دایود بستگی داشته و توسط رابطه‌ی زیر مشخص می‌شود:

$$T_j - T_c = \theta_{jc} P_j \qquad (1-7)$$

در رابطه: $T_j - T_c$ افزایش درجه حرارت پیوند نسبت به درجه حرارت بدنه‌ی دایود برحسب ^oC

P_j توان الکتریکی تلف شده در پیوند، W

θ_{jc} مقاومت حرارتی بین پیوند و بدنه برحسب $^oC/W$

است. مقاومت حرارتی دایود با توجه به مشخصات دایود مورد نظر است و معمولاً توسط کارخانه سازنده مشخص می‌شود.

برای بررسی بیشتر مسأله حرارتی، شکل الف ۲۸-۱ را در نظر بگیرید. دایود بدون گرمادهی است و در نظر می‌گیریم. تفاوت درجه حرارت بدنه و محیط نیز برابر حاصلضرب توان تلف شده P_j در مقاومت حرارتی بین بدنه و محیط یعنی θ_{ca} است. بنابراین تفاوت درجه حرارت پیوند و محیط را می‌توان از رابطه‌ی زیر بدست آورد:

$$T_c - T_a = \theta_{ca} P_j \qquad (1-8)$$

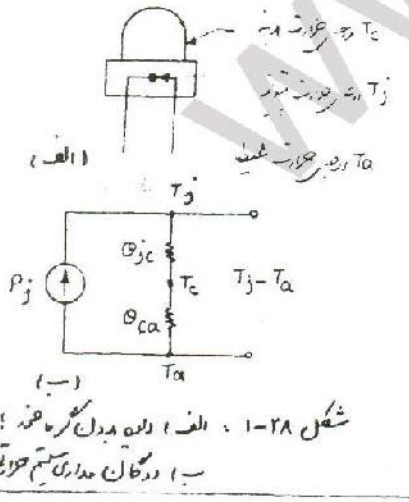
دوگان مداری سیستم حرارتی شکل الف ۲۸-۱ در شکل ب ۲۸-۱ مقابل دیده می‌شود:

افت ولتاژ	→	افت حرارت $T_j - T_a$
منبع جریان ثابت	→	تلف توان P_j
مقاومت الکتریکی	→	مقاومت حرارتی $\theta_{jc} + \theta_{ca}$

با توجه به شکل ب ۲۸-۱ و روابط (۶-۱) و (۷-۱) می‌توان نوشت:

$$T_j = P_j \theta_{jc} + P_j \theta_{ca} + T_a \qquad (1-9)$$

این نتیجه را می‌توان برای مدار شکل ب ۲۷-۱ نیز تعمیم داده و رابطه زیر را بدست آورد:



شکل ۲۸-۱ : الف) دایود بدون گرمادهی؛ ب) دوگان مداری سیستم حرارتی آن.

(1) Power - handling

(2) Thermal resistance

www.itmar.ir

$$T_j = P_j (\theta_{jc} + \theta_{cs} + \theta_{sa}) + T_a \qquad (1-10)$$

در آن : θ_{cs} مقاومت حرارتی بین گرما خور و بدنه (به اقلام عایق) ،

θ_{sa} مقاومت حرارتی بین گرما خور و محیط است .

با استفاده از این رابطه شرایط زیر در نظر گرفته می شود .

۱. با گرم شدن پیوند توسط کارخانه سازنده داده می شود ، مقادیر نمونه ای این پارامتر برای دیودهای سیلیکن در حدود $100^{\circ}C$ و برای دیودهای سیلیکن در حدود $150^{\circ}C$ ، $200^{\circ}C$ می باشد .

۲. دمای محیط در یک محفظه کنترل نشده است و با محیط در سیستم در آن کار می کند، تبادل دارد .

۳. توان تلف شده در پیوند در سیستم الکتریکی تبادل دارد و برای جریان دولتاژ متغیر با زمان توسط رابطه زیر تعیین می شود :

$$P_j = \frac{1}{T} \int_0^T v_D(t)\, i_D(t)\, dt \qquad (1-11)$$

در حالت ماندگار dc رابطه فوق به صورت زیر در می آید :

$$P_j = V_D I_D \qquad (1-12)$$

۴. مقاومت حرارتی θ_{jc} دیود در مقدار مشخص توسط کارخانه سازنده تعیین می شود .

با استفاده از مطالب فوق و رابطه (۹-۱) ملاحظه می شود که مقاومت حرارتی بدنه - به - محیط تنها پارامتری است که برای کارکرد سالم دیود و برای نگهداشتن دمای حرارتی پیوند در یک حد مشخص می تواند کنترل شود .

رابطه (۹-۱) با سرزان می تواند به صورت زیر نوشته شود :

$$\theta_{ca} = \frac{T_{j\,max} - T_a}{P_j} - \theta_{jc} \qquad (1-13)$$

از این رابطه می توان مقدار θ_{ca} را برای عملکرد سالم دیود بدست آورد .

مثال ۱-۱ : یک دیود سیلیکن $50\,W$ در یک مدار حاصل $10\,W$ تلف توان دارد . اگر مقدار دمای حرارتی مجاز پیوند $175^{\circ}C$ ، دمای حرارتی محیط $50^{\circ}C$ و $\theta_{jc} = 2.4^{\circ}C/W$ باشد . اگر مقدار مقاومت حرارتی گرما خور مورد نیاز در محیط قرار داده شود ، تا دمای حرارتی پیوند از $175^{\circ}C$ تجاوز نکند را بدست آورید .

حل : داریم

$$\theta_{ca} = \frac{175 - 50}{10} - 2.4 = 10.1 \ ^{\circ}C/W$$

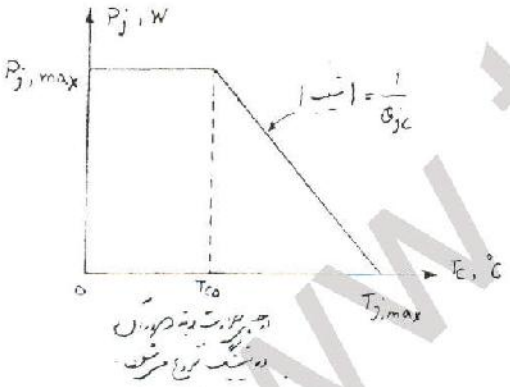
اگر از یک خنک‌کننده پره‌ای مشکی برای این دیود استفاده کنیم در اینصورت $\theta_{ca} = 3.2 \ ^{\circ}C/W$ خواهد شد، در اینصورت حداکثر توان مجاز تلف شده در دیود از مقدار فوق بیشتر خواهد شد و به مقدار $175^{\circ}C$ خواهد رسید، در اینصورت حداکثر توان در حرارت محیط صفر می‌شود یا به شرایط کار از نظر (۱-۱۵) بدست آورد. در اینصورت داریم:

$$T_j = (10)(2.4 + 3.2) + 50 = 106 \ ^{\circ}C$$

منحنی‌های دریتینگ[1]

توان مجاز دیود معمولاً در دمای حرارت محیط $25^{\circ}C$ مشخص داده می‌شود. حداکثر توانی که دیود می‌تواند در دماهای بالاتر تلف کند، با افزایش دمای حرارت محیط کاهش می‌یابد تا دمای حرارت محیط از حد معینی تجاوز نکند. سازنده‌ها معمولاً منحنی‌هایی را که ارتباط بین مقدار ماکزیمم توان تلف شده مجاز برای دمای حرارت مختلف را مشخص می‌کنند، منحنی‌های دریتینگ می‌نامند.

در شکل ۲۹-۱ یک منحنی نمونه دریتینگ نشان داده شده است. در دمای حرارت بیش از T_{C0}، دیود می‌تواند توان ماکزیمم خود را تلف کند. در دمای حرارتهای بالاتر از T_{C0} ماکزیمم مقدار مجاز توان تلف شده باید تا اندازه‌ای کاهش یابد تا $T_C = T_{j\,max}$ گردد. در این دمای حرارت ماکزیمم توانی که دیود می‌تواند تلف کند، برابر با صفر است، زیرا در اینصورت هرگونه تلف توانی باعث بالا رفتن دمای حرارت پیوند از حد مجاز خواهد شد.



شکل ۲۹-۱ : منحنی دریتینگ دیود.

برای دیود مشخص در دمای حرارت محیط کاهش تلف توان مجاز با افزایش θ_{jc} ثابت است.

بنابراین برای $T_{C0} \le T_C \le T_{j\,max}$ داریم:

$$\frac{T_{j\,max} - T_{C0}}{P_{j,max}} = \frac{T_{j\,max} - T_C}{P_j}$$

چون $\theta_{jc} = \frac{T_j - T_C}{P_j}$ است، بنابراین مقدار توان مجاز (۱-۱۴) با تصحیح زیر است:

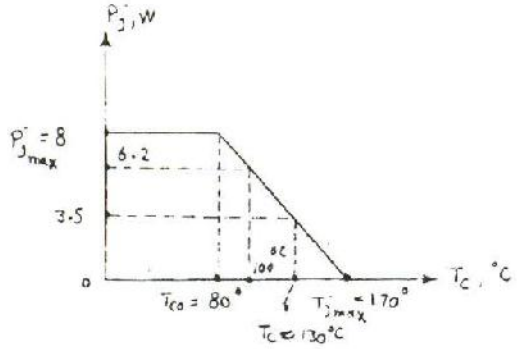
$$\theta_{jc} = \frac{T_{j\,max} - T_{C0}}{P_{j,max}} \qquad (۱-$$

۱-۲ : منحنی دریتینگ یک دیود در شکل ۳۰-۱ نشان داده شده است. اگر در مداری در این دیود کار کند، تلف

[1] Derating

www.tnar.ir

آن $3.5\ W$ بوده و دمای محیط $100\ ^\circ C$ باشد : الف) θ_{ca} را طوری بدست آورید که دمای محیط بیشتر از حد مجاز نشود . ب) T_C را در این حالت بدست آورید . ج) اگر بتوان این دفعه از گرمانده ۱۰۰٪ بهره برد ($\theta_{ca}=0$) استفاده شود ، تلف توان مجاز دفعه چه مقدار می‌تواند باشد ؟



شکل ۳۰-۱ : منحنی دریتینگ مثال ۲-۱ .

حل : الف) با استفاده از منحنی دریتینگ داریم :

$$T_{j\,max} = 170\ ^\circ C$$

با توجه به رابطه (۱-۱۵) مقاومت θ_{jc} داده شده است آوردن داریم :

$$\theta_{jc} = \frac{170-80}{8} = \frac{90}{8} = 11.25\ ^{oC}/W$$

با استفاده از رابطه (۱-۱۴) داریم :

$$\theta_{ca} = \frac{T_{j\,max} - T_a}{P_j} - \theta_{jc}$$

$$= \frac{170-100}{3.5} - 11.25 = 8.75\ ^{oC}/W$$

ب) برای پیدا کردن دمای محیط بدنه از $P=3.5\ W$ خطی عمودی از محور T رسم می‌کنیم و منحنی محل برخورد این خط ، منحنی دریتینگ دمای محیط بدنه را مشخص می‌کند ($T_C=130^\circ C$) . البته مقدار T_C را می‌توان از رابطه (۱-۷) نیز محاسبه نمود .

ج) اگر $\theta_{ca}=0$ باشد رابطه $T_C=T_a$ مشخص و دمای مورد نظر با رسم خط عمودی از نقطه $T_C=T_a=100^\circ C$ روی منحنی دریتینگ و بدست آوردن محل برخورد این خط با منحنی ، تلف توان مجاز بدست آورد ($P_j=6.2\ W$) . این مقدار را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (۱-۹) نیز تعیین نمود .

۱۱-۱ : مشخصات دلوید (داده شده توسط سازنده)

مجموعه مشخصاتی که توسط سازنده برای عناصر نیمه‌رسانا داده می‌شود به دو صورت است . یک نوع مشخصات در واقع مختصر عنصر را معرفی می‌کند و از روی آن می‌توان اطلاعات مورد نظر را در مورد مشخصات آن تک تک عنصر بدست آورد . نوع دیگری از مشخصات شامل نتایج آزمایش بال مختلف در مورد عنصر است که در مجموعه به صورت نمودارها و منحنی‌های مختلف داده می‌شود .

مشخصاتی که در مجموعه در مورد دیودهای نیمه‌رسانا در اوراق سازنده تعیین می‌شود به قرار زیر هستند .

۱. ماکزیمم ولتاژ مستقیم $V_{F(max)}$ (در جریان مشخص و در دمای حداکثر خاصی داده می‌شود) .

۲. ماکزیمم جریان مستقیم $I_{F(max)}$ (داده شده در دمای حداکثر مشخص) .

۳. ماکزیمم جریان معکوس $I_{R(max)}$ (داده شده در دمای حداکثر مشخص) .

www.tnar.ir

۴. مقدار ماکزیمم ولتاژ معکوس دربار PIV یا PRV یا $V_{(BR)}$ مشخص میشود.

۵. خازن معادل دیود.

۶. ماکزیمم جریان مجاز عبوری پیوند.

بسته به نوع دیود، ممکن است اطلاعات دیگری نظیر محدوده فرکانسی[1]، سطح نویز[2]، زمان قطع و وصل[3] و مقادیر ماکزیمم برای کمیت‌های تکرارشونده[4] نیز علاوه بر مشخصات فوق الذکر داده شود.

در جدول (۱-۱) مشخصات یکسری از دیودهای نیمه‌هادی ساخت کارخانه‌ی تگزاس اینسترومنت (TI)[5] داده شده است. دقت شود که ولتاژ ماکزیمم مستقیم همه‌ی این دیودها 1 V است و در صورتی که جریان ماکزیمم مستقیم برای این سری از 1 تا 200 mA تغییر میکند.

برای دیود IN463 مصرف‌کننده توان، از روی مشخصات ماکزیمم جریان و ولتاژ مستقیم بدست آورد:

$$P_d = V_d I_d = (1)(1 \times 10^{-3}) = 1\ mW$$

لطف در شماره مشخص این دیود از سری دیودهای توان کم[6] میباشد.

جدول ۲-۱: مشخصات دیودهای کاربرد عام[7]

نوع عنصر	بایاس مستقیم		V_{BR} (V)	I_R ماکزیمم			
				25 °C		150 °C	
	I_F(mA)	V_F(V)		V	μA	V	μA
IN463	1.0	1.0	200	175	0.5	175	30
IN462	5.0	1.0	70	60	0.5	60	30
IN459A	100.0	1.0	200	175	0.025	175	5
T151	200.0	1.0	70	10	1	—	—

در صفحه بعد مشخصات کامل دیودهای BAY73 و BA129 از سری دیودهای ولتاژ زیاد[8] و نشتی کم[9] میباشد، که است (این مشخصات از اوراق سازنده‌ی فیرچایلد[10] آورده شده است). همانطور که ملاحظه میشود در این اطلاعات برای مشخصات دیود داده شده است. در اینجا به بررسی و تعریف بعضی از این اطلاعات میپردازیم:

۱. جریان یکسو شده‌ی متوسط[11]: جریان یکسو شده‌ی نشان داده شده در شکل ۱-۱۳ برای مقدار متوسط $I_{av} = \frac{I_{peak}}{\pi}$ است. پارامتر جریان یکسو شده متوسط برای دیود معمولاً از جریان پیوسته مستقیم مشخص شده، کمتر است، زیرا برای یک جریان یکسو شده کمتر از مقدار ماکزیمم لحظه‌ای میباشد.

(1) frequency range
(2) noise level
(3) switching time
(4) repetitive
(5) Texas Instrument
(6) low-power
(7) general-purpose
(8) high-voltage
(9) low-leakage
(10) Fair child
(11) averaged rec current

www.ttmar.ir

۲. ماکزیمم جریان مستقیم تکرارشونده[1] – این پارامتر معمولاً در جریان تکرارشونده و حالت دایمی مستقیم دیود را نشان میدهد. باید دقت کرد که در هیچ یک از جریان در مدت کمتر از میلی ثانیه در دیود برقرار نشود. بنابراین معمولاً آن مقدار از جریان پیوسته نیست باشد.

۳. ماکزیمم جریان مستقیم گذرا[2] – گاهی وقت‌ها در مدارها براثر قطع و وصل کلید و یا عوامل دیگر، جریانی در مدار با مقدار خیلی زیاد و زمان خیلی کم ایجاد میشود (این جریان تکرارشونده نیست). این پارامتر برای دیود، ماکزیمم جریان مستقیم گذرا را که میتواند تحمل کند، مشخص میکند.

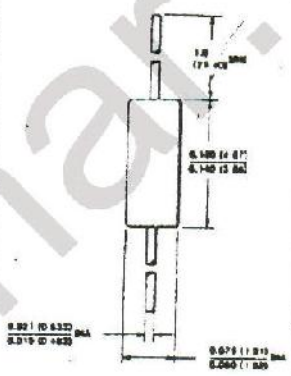
DIFFUSED SILICON PLANAR

- BV 125 V (MIN) @ 100 µA (BAY73)
- BV 200 V (MIN) @ 100 µA (BA129)

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 1)

Temperatures			
Storage Temperature Range			−65°C to +200°C
Maximum Junction Operating Temperature			+175°C
Lead Temperature			+260°C
Power Dissipation (Note 2)			
Maximum Total Power Dissipation at 25°C Ambient			500 mW
Linear Power Derating Factor (from 25°C)			3.33 mW/°C
Maximum Voltage and Currents			
WIV	Working Inverse Voltage	BAY73	100 V
		BA129	180 V
I_O	Average Rectified Current		200 mA
I_F	Continuous Forward Current		500 mA
I_f	Peak Repetitive Forward Current		800 mA
$I_{F(surge)}$	Peak Forward Surge Current		
	Pulse Width = 1 s		1.0 A
	Pulse Width = 1 µs		4.0 A

DO-35 OUTLINE



NOTES:
Copper clad steel leads, tin plated
Gold plated leads available
Hermetically sealed glass package
Package weight is 0.14 gram

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (25°C Ambient Temperature unless otherwise noted)

SYMBOL	CHARACTERISTIC	BAY73 MIN	BAY73 MAX	BA129 MIN	BA129 MAX	UNITS	TEST CONDITIONS
V_F	Forward Voltage	0.85	1.00			V	I_F = 200 mA
		0.81	0.94			V	I_F = 100 mA
		0.78	0.88	0.78	1.00	V	I_F = 50 mA
		0.69	0.80	0.69	0.83	V	I_F = 10 mA
		0.87	0.75			V	I_F = 5.0 mA
		0.60	0.68	0.60	0.71	V	I_F = 1.0 mA
				0.51	0.60	V	I_F = 0.1 mA
I_R	Reverse Current		500			nA	V_R = 20 V, T_A = 125°C
			5.0			nA	V_R = 100 V
			1.0			µA	V_R = 100 V, T_A = 125°C
					10	nA	V_R = 180 V
					5.0	µA	V_R = 180 V, T_A = 100°C
BV	Breakdown Voltage	125		200		V	I_R = 100 µA
C	Capacitance		8.0		8.0	pF	V_R = 0, f = 1.0 MHz
t_{rr}	Reverse Recovery Time		3.0			µs	I_f = 10 mA, V_r = 35 V R_L = 1.0 to 100 KΩ C_L = 10 pf, JAN 258

NOTES
1. These ratings are limiting values above which the serviceability of the diode may be impaired
2. These are steady state limits. The factory should be consulted on applications involving pulses or low duty cycle operation

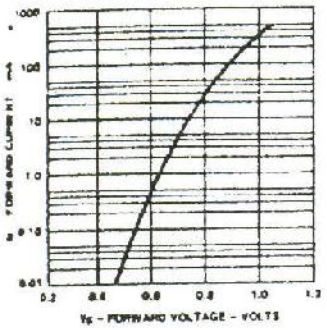
(۱) Peak Repetitive Forward Current (۲) Peak Forward Surge Current

www.tmar.ir

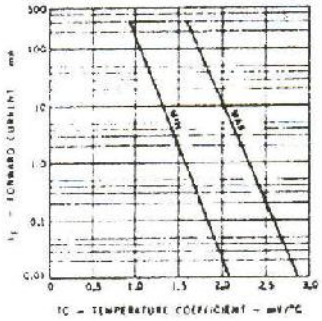
TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTIC CURVES

AT 25°C AMBIENT TEMPERATURE UNLESS OTHERWISE NOTED

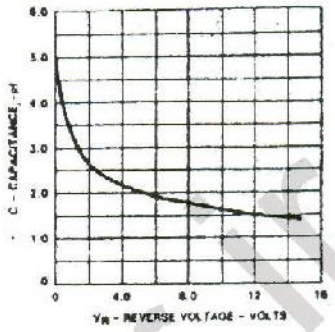
FORWARD VOLTAGE VERSUS FORWARD CURRENT



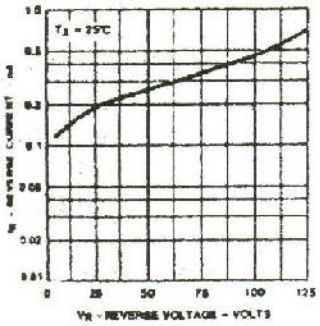
FORWARD CURRENT VERSUS TEMPERATURE COEFFICIENT



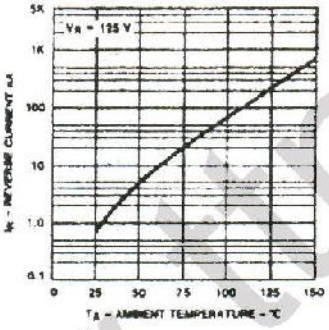
CAPACITANCE VERSUS REVERSE VOLTAGE



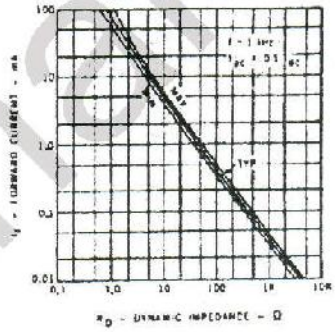
REVERSE VOLTAGE VERSUS REVERSE CURRENT



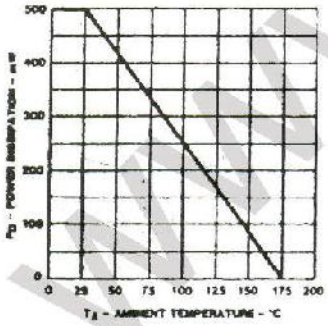
REVERSE CURRENT VERSUS AMBIENT TEMPERATURE



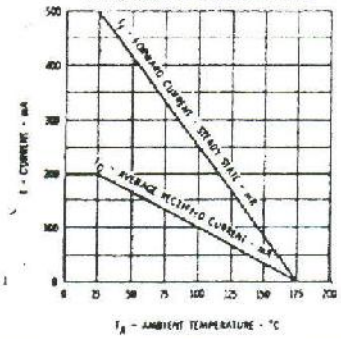
DYNAMIC IMPEDANCE VERSUS FORWARD CURRENT



POWER DERATING CURVE



AVERAGE RECTIFIED CURRENT AND FORWARD CURRENT VERSUS AMBIENT TEMPERATURE



www.ithr.ir

۱-۱۲ : تجزیه وتحلیل مدارهای دیودی

در این قسمت به بررسی رفتار مدارهای شامل دیود، متشکل از منابع ثابت، دیود و مقاومت که اخیراً شرح داده شد. ابتدا مدار دیود ایده‌آل سری را بررسی کرده و سپس اثر مقاومت دیود را در نظر می‌گیریم. سپس مدارهای دیودی با دیود حقیقی که مشخصه آن قبلاً مورد بحث قرار گرفت، بررسی می‌شود.

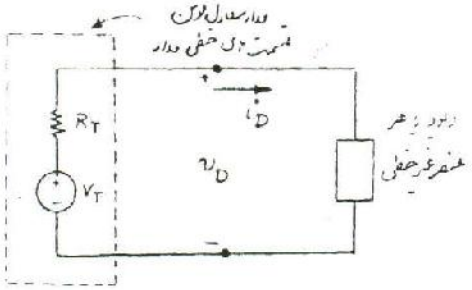
مدارهای دیودی را می‌توان به دو دسته تحلیل ترسیمی و تحلیلی تقسیم نمود. استفاده از روش ترسیمی برای حل مدارهای با المانهای غیر خطی

مثبتی است :

۱ . رفتار دیود در فرکانس های پایین بسامدگی توسط مشخصه دیود ـ آمپر مشخص می شود . معمولاً این مشخصه توسط کارخانه سازنده داده شده و یا بسامدگی مستقیماً آزمایشگاه تجربه بدست آورد .

۲ . سایر عناصر مدار ، معمولاً خطی هستند و می توان آنها را با یک مدار معادل تونن[1] که از ترکیبات پایه ای ساده حاصل می شود جایگزین نمود .

حال فرض می کنیم که دو قسمت مورد بحث مدار (دیود و مدار معادل تونن سایر قسمتهای مدار) در شکل ۳۱-۱ نشان داده شده باشند . در این صورت با توجه به این شکل می توان روابط زیر را برای دو قسمت مختلف مدار نوشت :



شکل ۳۱-۱ یک مدار عمومی ، شامل عنصر غیر خطی .

$$i_D = f(v_D) \qquad (۱-۱۶)$$: عنصر غیر خطر (دیود)

$$v_D = V_T - i_D R_T \qquad (۱-۱۷)$$ مدار معادل تونن

در اینجا دو معادله با دو مجهول i_D و v_D موجود است که با حل همزمان این دو معادله می توان مجهول i_D را تعیین نمود . هنگامی که دو قسمت مدار بهم متصل می شوند این دو معادله بطور همزمان برقرار شده و مقادیر مجهول (i_D و v_D) را می توان از حل دستگاه معادلات (۱-۱۶) و (۱-۱۷) بدست آورد . اگر رابطه بین جریان i_D و v_D برای عنصر غیر خطی مشخص باشد ، در اینصورت جواب را می توان بصورت تحلیلی بدست آورد . بعنوان مثال اگر عنصر غیر خطی یک دیود سیلیکن باشد ، در اینصورت می توان از رابطه (۴-۱) استفاده کرد و مقادیر جریان و ولتاژ دیود و یا سایر متغیرهای مدار را تعیین نمود . واضح است که بعلت پیچیدگی این رابطه ، چنین محاسباتی ساده نخواهد بود و بدون برنامه کامپیوتری قادر به بدست آوردن جواب جامع نیست . در بعضی از موارد می توان از چنین روشی استفاده نمود ولی در اکثر موارد با الاهام از روشهای استفاده از آن بدست نیست : در بسیاری از موارد احتیاج به دقت زیاد در حل مسائل نیست ، لذا در چنین روشهای ساده و تقریبی برای بدست آوردن آن مناسب است ؛ و همچنین وقت بدست آمده در حل دقیق ، اغلب بی معنی است ، زیرا رفتار دیود عملی معمولاً مشابه رابطه (۴-۱) در بطور تقریبی بدست آمده ، دیود در عمل تغییرات زیادی نیز در مشخصه های دیودهای یک نوع ، نشان میدهد .

مدار دیود را می توان بروش ترسیمی نیز حل نمود . برای این منظور روابط (۱-۱۶) و (۱-۱۷) در یک سیستم محورهای مختصات رسم شده و از محل تلاقی منحنی های مربوطه می توان مقادیر جریان و ولتاژ دیود را تعیین نمود .

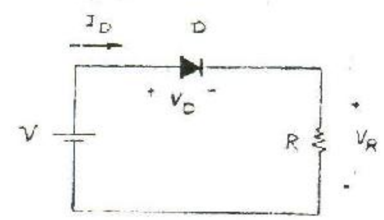
خط بار[2] و نقطه ی کار[3]

شکل ۳۲-۱ یک مدار ساده دیودی را نشان میدهد که از یک دیود و یک مقاومت و یک منبع ولتاژ تشکیل شده است . با اعمال قانون ولتاژ

---

(۱) Thevenin equivalent circuit (۲) load line (۳) quiesent point

کیرشف[1] (KVL) می‌توان نوشت :



شکل ۱-۳۲ : مدار ساده‌ی دیودی

$$V = V_D + V_R \qquad (1-18)$$

رابطه‌ی فوق را با استفاده از اینکه $V_R = I_D R$ می‌باشد می‌توان بصورت زیر نوشت :

$$V_D = V - I_D R \qquad (1-19)$$

رابطه‌ی (۱-۱۹) دارای دو متغیر وابسته I_D و V_D است . چون برای حل چنین معادله‌ای در دارای دو مجهول است حداقل یک رابطه‌ی دیگر لازم می‌باشد بنابراین از رابطه‌ی فوق تنها می‌توان متغیرها را برحسب یکدیگر بدست آورد . رابطه‌ی دیگر را برای حل چنین معادله‌ای می‌توان از مشخصه‌ی دیود بدست آورد . می‌دانیم در هر دیود ، جریان تابعی از ولتاژ دو سر آن است و این تابع بصورت رابطه‌ی (۱-۱۶) نشان داده می‌شود . روابط (۱-۱۶) و (۱-۱۹) را مجموعاً می‌توان بصورت یک دستگاه ، بصورت زیر نوشت :

$$V_D = V - I_D R \qquad (1-19)$$

$$I_D = f(V_D) \qquad (1-16)$$

می‌توان از حل این دو معادله مقادیر جریان و ولتاژ دیود را بدست آورد . ولی همانطور که قبلاً اشاره شد حل تحلیلی این دستگاه ، بنا به دلایر ذکر شده ضروری نیست و می‌توان آن را به روش ترسیمی حل نمود . لازم به یادآوری است که چنین روش جهت حل بسیاری از سایر مدارهای الکترونیک نظیر مدارهایی که در ساختمان عنصر غیرخطی مثل ترانزیستور و FET وغیره هستند ، بکار می‌رود ، از اهمیت خاصی برخوردار است .

معادله‌ی (۱-۱۹) را می‌توان بصورت زیر نیز نوشت :

$$I_D = -\frac{1}{R} V_D + \frac{V}{R} \qquad (1-20)$$

بطوری که ملاحظه می‌شود این معادله یک خط را در صفحه $I_D - V_D$ نشان می‌دهد . شیب این خط منفی بوده و برابر $-\frac{1}{R}$ است . محل تلاقی خط با محور افقی (محور ولتاژ) نقطه‌ی $V_D = V$ و با محور عمودی (محور جریان) نقطه‌ی $I_D = V/R$ خواهد بود . بنابراین در یک مدار مشخص با داشتن مقادیر منبع ولتاژ و مقاومت R می‌توان این خط را بسادگی رسم نمود . چنین خطی را **خط بار** و محل تلاقی آن را با مشخصه‌ی دیود نقطه کار می‌نامند .

مثال ۳-۱ : در مدار شکل ۱-۳۲ ، مقادیر $R = 1^k$ و $V = 8^V$ بوده و دیود D که یک دیود سیلیکنی با مشخصه نشان داده

---

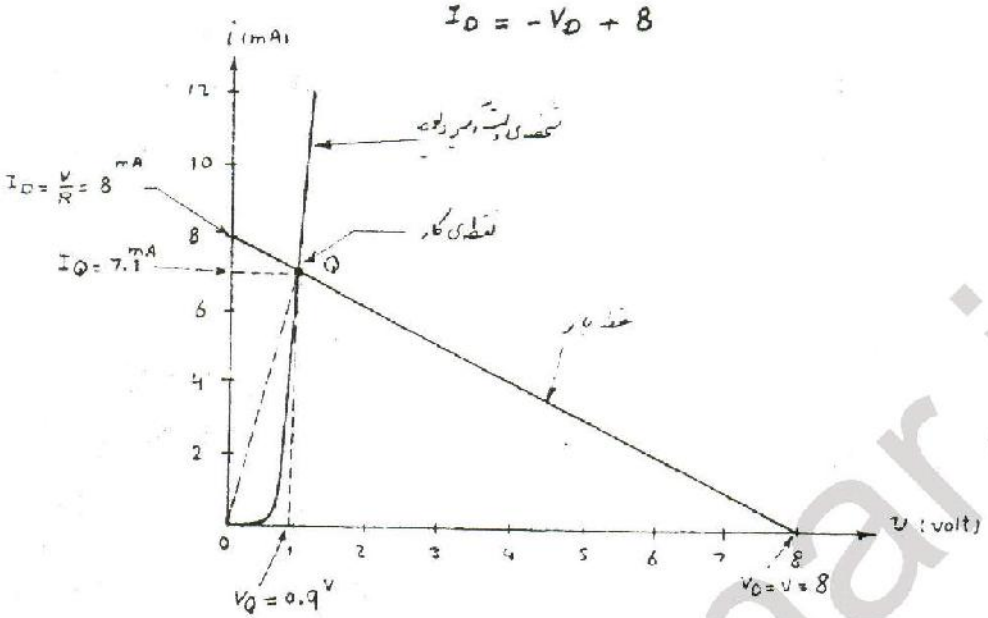
(1) Kirchhoff's Voltage Law

www.ttnaf.ir

شده در شکل ۳۳-۱ است . جریان مدار و ولتاژ دوسر باتری و دیود را بدست آورید .

حل : با قرار دادن مقادیر R و V در رابطه (۲۵-۱) خواهیم داشت :

$$I_D = -V_D + 8$$



شکل ۳۳-۱ ، مشخصه ی دیود سیلیکون و خط بار و نقطه ی کار مثال ۳-۱ .

با رسم این خط بار در صفحه ی مشخصه ی دیود سیلیکون ، محل تلاقی این خط بار با مشخصه ی دیود بدست میآید . این نقطه در همان نقطه کار است جریان و ولتاژ دوسر دیود را تعیین میکند .

$$I_D = I_Q = 7.1 \text{ mA}$$

$$V_D = V_Q = 0.9 \text{ volt}$$

برای بدست آوردن V_R داریم :

$$V_R = V - V_D = 8 - 0.9 = 7.1 \text{ V}$$

یا

$$V_R = R \cdot I_Q = 1 \times 7.1 = 7.1 \text{ V}$$

همچنین میتوان توان مصرف شده در بار R و دیود D را بدست آورد :

$$P_R = R I_Q^2 = 10^3 \times (7.1 \times 10^{-3})^2 = 50.41 \times 10^{-3} = 50.41 \text{ mW}$$

توان تحویل داده شده توسط منبع عبارتست از :

$$P_S = V \cdot I_Q = 8 \times 7.1 = 56.8 \text{ mW}$$

و بالاخره توان تلف شده در دیود برابر حاصلضرب یا :

$$P_D = V_D I_D = V_Q \cdot I_Q = 0.9 \times 7.1 = 6.39 \text{ mW}$$

www.tiran.ir

$$P_D = P_S - P_R = 56.8 - 50.41 = 6.39 \ mW$$ و یا

۱-۱۳ مقاومت استاتیک[1] دیود

با توجه به شکل ۱-۳۳ شاهد هستیم در هر نقطه و نقطه کار مشخص دارای جریان و ولتاژ معینی می‌باشد. به کمک این دو کمیت مهم[2] در مورد ولتاژ و جریان دیود، برای هر نقطه و نقطه کار مشخص می‌توان کمیتی داشت که در این مقاومت را مقاومت dc و یا مقاومت استاتیک دیود می‌نامند.

$$R_{dc} = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{V_Q}{I_Q} \qquad (۱-۲۱)$$

به عنوان مثال برای دیود مثال ۱-۳ در نقطه کار به دست آمده خواهیم داشت:

$$R_{dc} = \frac{V_Q}{I_Q} = \frac{0.9}{7.1 \times 10^{-3}} = 126.8 \ \Omega$$

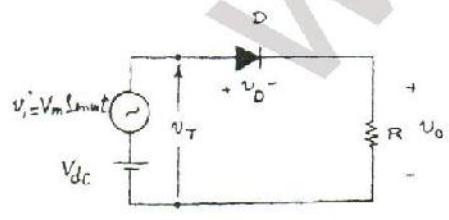
مقاومت dc دیود، با تغییر نقطه کار تغییر خواهد نمود و متفاوتی است در هنگام آزمایش سالم و یا معیوب بودن دیود نقطه مهم نیز نشان داده می‌شود. بدیهی است در این مقاومت برای حالت بایاس معکوس دیود خیلی زیاد خواهد شد. مثلاً برای یک دیود سیلیکن در بهت بایاس معکوس، با $I_D = 1 \ \mu A$ و $V_D = 20 \ V$ خواهیم داشت:

$$R_{dc} = \frac{20}{1 \times 10^{-6}} = 20 \ M\Omega$$

۱-۱۴: تجزیه و تحلیل سیگنال‌های کوچک[3] ـ مقاومت دینامیکی دیود[4]

در کنار دیود دیود ممکن است علاوه بر منبع ولتاژ dc، یک منبع ولتاژ ac نیز در مدار وجود داشته باشد. مدار شکل ۱-۳۴ چنین مداری را نشان می‌دهد. در این است ولتاژ ac کمی شده به مدار دیودی به صورت مجموع دو ولتاژ dc و ac می‌باشد.

$$v_T = V_{dc} + V_m \sin \omega t \qquad (۱-۲۲)$$



شکل ۱-۳۴

هنگامی که ولتاژ ac اعمال شده به مدار در مقایسه با ولتاژ dc مقدار خیلی کوچکی باشد ($V_m \ll V_{dc}$) در این صورت چنین ولتاژی را سیگنال کوچک می‌نامند. برای تجزیه و تحلیل چنین مداری از روشی استفاده می‌شود که

---

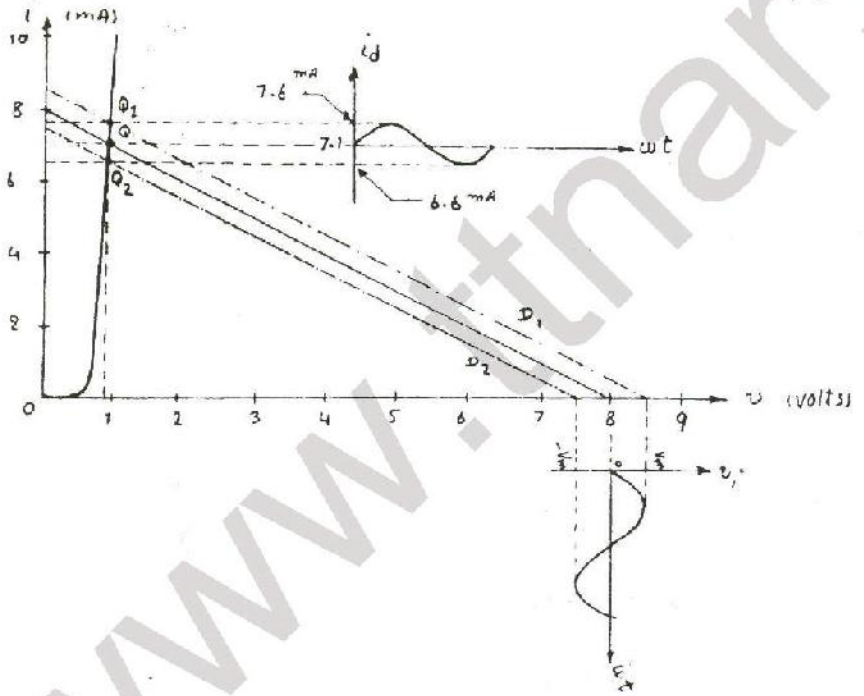
(1) Static resistance
(2) small signal analysis
(3) dynamic resistance

www.tinar.ir

آن تجزیه یکسو سنگنال کوچک می‌گویند . تجزیه یکسو سنگنال کوچک را می‌توان به صورت ترسیمی تکمیل انجام داد . ابتدا به بررسی روش ترسیمی با ذکر یک مثال می‌پردازیم .

مثال ۴-۱ : در مدار شکل ۴-۱ ، مقدار $R = 1^{k}$ و $V_{dc} = 8^{volts}$ است و دیود D دارای مشخصه‌ای نشان داده شده در شکل ۳-۱ است . هرگاه $v_i = 0.5^{(V)} \sin \omega t$ باشد ، جریان مدار را بدست آورید .

حل : در شکل ۴-۱ خط بارگذاری از ولتاژ dc نشان داده شده است . این خط بازای $v_i = 0$ رسم شده است . علاوه بر این خط ، دو خط D_1 و D_2 نیز بطور مماس بر آن رسم شده است . این خطوط اثر منبع سنگنال ac را در لحظات ماکزیمم و مینیمم منبع ولتاژ متناوب نشان می‌دهد . یعنی D_1 مربوط به زمانی است که مقدار منبع ولتاژ ac ماکزیمم می‌شود .



شکل ۴-۱ . تجزیه یکسو سنگنال کوچک به روش ترسیمی .

مقاومت ولتاژ کل در مدار $8 + \frac{1}{2} = 8.5^{V}$ بوده و در نقطه برش خط بار مربوط به D_1 است . مرکز خط بار D_1 را به اندازه‌ی $\frac{1}{2}^{V}$ به طرف راست انتقال داد . همینطور به ازای مقدار مینیمم ولتاژ ac ، مقدار کل ولتاژ دو سری $8 - \frac{1}{2} = 7.5^{V}$ بوده و در نقطه برش انتقال خط بار D به اندازه $\frac{1}{2}^{V}$ به طرف چپ مرکز خط بار D_2 را رسم نمود . واضح است در اثر منبع ولتاژ متناوب در هر لحظه در نظر گرفته شود ، در نهایت خط بار مربوط به هر لحظه بین این دو حالت حدی قرار خواهد گرفت . به ترتیب می‌توان به طریق ترسیمی شکل جریان دیود و از روی آن سایر تغییرهای مدار را تعیین نمود . این تغییرها در شکل ۴-۱ نشان داده شده است . مختصات نقاط Q_1 و Q_2 به ترتیب عبارتست از $(7.6^{mA}, 0.915^{V})$ و $(6.6^{mA}, 0.885^{V})$

دست می‌آید . بنابراین می‌توان نوشت ،

$$i_D = I_{dc} + i_d$$

در رابطه آن $i_d = I_m \sin \omega t$ است . مابقیه به شکل مقدار I_m تقریب زیر دست می‌آید :

$$I_m = \frac{I_{Q_1} - I_{Q_2}}{2} = \frac{7.6 - 6.6}{2} = \frac{1}{2} \ mA$$

بنابراین :

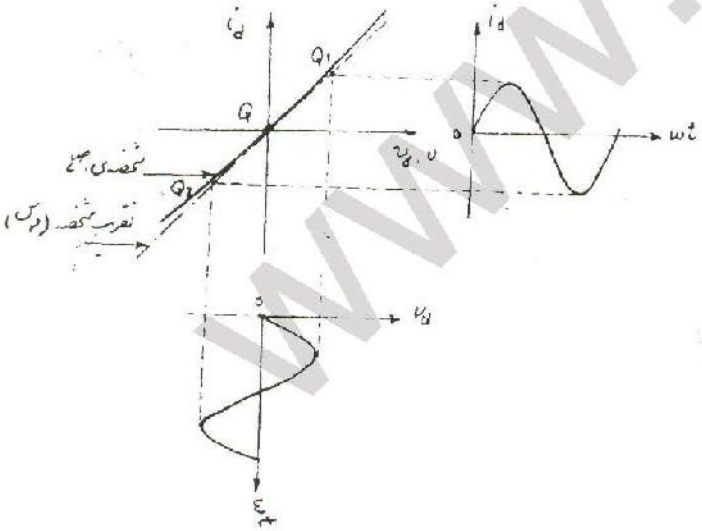
$$i_D = 7.1 + 0.5 \sin \omega t \quad (mA)$$

برای بدست آوردن ولتاژ خروجی (v_o) داریم :

$$v_o = R\, i_D = 7.1 + 0.5 \sin \omega t \quad (V)$$

بطوریکه ملاحظه می‌شود ولتاژ ac دستگاه تقویت‌کننده خروجی ظاهر شده و آنرا دارای dc می‌باشد . لذا با این مفهوم مقاومت بینهایت کوچک دینامیکی دیود چنین وظیفه‌ای را خواهد داشت .

با توجه به شکل ۳۴-۱ ملاحظه می‌شود که منبع ولتاژ dc سبب می‌شود که دیود برای سیگنال کوچک همواره در حالت بایاس قرار گرفته و برای یک سیگنال، تنها قسمتی از مشخصه آن در بین نقاط Q_1 و Q_2 قرار گرفته و تقریباً همان سیگنال ac را خواهد داشت . این قسمت را می‌توان با تقریب خوبی با خط راست بین دو نقطه‌ی Q معادل قرار داد . چنین عملی در شکل ۳۵-۱ نشان داده شده است .



شکل ۳۵-۱ : تقریب مشخصه برای سیگنال کوچک حول نقطه‌ی کار .

در این شکل محدوده‌ی مشخصه برای سیگنال ac به نقطه‌ی کار Q منتقل شده و i_d و v_d مربوط به سیگنال ac تریلشان داده شده اند . با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که در این ناحیه می‌توان دیود را با یک مقاومت معادل جایگزین کرد که در مقدار آن عکس شیب خط راست می‌باشد . این مقاومت را مقاومت دینامیکی دیود می‌نامند .

$$r_d = \left. \frac{\Delta v_D}{\Delta i_D} \right|_{\text{نقطه } Q} \qquad (۱-۲۴)$$

www.itnaf.ir

یادآوری است که در مقدار r_d تابع نقطه کار دیود و با تغییر مقدار آن تغییر می‌کند. با استفاده از رابطه‌ی فوق می‌توان مقدار این مقاومت را به صورت تحلیلی نیز بدست آورد. با توجه به اینکه r_d شخص کننده شیب مشخصه‌ی دیود در نقطه‌ی کار است می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (۱-۴) نوشت:

$$\frac{1}{r_d} = \frac{dI_D}{dV_D} = \frac{1}{\eta V_T}(I + I_0) \qquad (۱-۲۳)$$

برای مقادیر $I \gg I_0$، مقدار $I + I_0 \approx I$ بوده و با توجه به اینکه برای مقادیر زیاد جریان مقدار η برابر حدود دیود سیلیکن و ۱ در نظر گرفته می‌شود رابطه‌ی اخیر به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{1}{\eta V_T} = \frac{11600}{T}$$

و برای دمای محیط (دمای معمولی) ($T = 300^{\circ}K$) داریم:

$$\frac{1}{\eta V_T} \approx \frac{1}{26\ (mV)}$$

بنابراین می‌توان نوشت:

$$r_d = \frac{dV_D}{dI_D} = \frac{0.026^{V}}{I_D} = \frac{26^{mV}}{I_D} \qquad (۱-۲۴)$$

با استفاده از رابطه‌ی فوق و با داشتن نقطه‌ی کار می‌توان مقاومت دینامیکی حول این نقطه کار را بدست آورد. در این صورت ملاحظه می‌شود در ای بررسی وقتی سیگنال کوچک و گذرا به دیود تسمیر اعمال می‌شود، دیود با قرار دادن مقاومت دینامیکی در مدار، می‌توان دقیقاً همین عمل را برای سیگنال کوچک بدست آورد.

همانطور که قبلاً گفته شد مشخصه‌ی دیود را معمولاً با مشخصه‌ی خطی آورده و از آن جهت استفاده می‌کنند که می‌توان با این مشخصه مقاومت بدنه و مقاومت اتصال فلزی کنتاکت را در نظر گرفت. برای بدست آوردن مقاومت دینامیکی دیود واقعی باید مقدار این مقاومت‌ها به مقاومت دینامیکی بدست آمده از رابطه‌ی (۱-۲۴) افزود. در این صورت خواهیم داشت:

$$r_d = \frac{26^{(mV)}}{I_{D\,(mA)}} + r_B^{(\Omega)} \qquad (۱-۲۵)$$

پارامتر r_B (که در هم بسته‌بندی مشخص) معمولاً از 0.1^{Ω} برای دیودهای توان بزرگ تا 2^{Ω} برای دیودهای توان کم در نظر گرفته می‌شود. با بهره‌گیری از مشخصه‌ی دیود، مقدار این مقاومت‌ها را می‌توان به طریقی که در رابطه‌ی (۱-۲۴) صحبت خواهد شد بدست آورد. در رابطه‌ی (۱-۲۵) مقدار I_D نیز برحسب mA قرار داده می‌شود تا مقدار اول این رابطه نیز برحسب اهم بدست آید.

به عنوان مثال برای $I_D = 1^{mA}$ و $r_B = 2^{\Omega}$ داریم:

www.tnar.ir

$$r_d = \frac{26}{1} + 2 = 28\ \Omega$$

در جریانهای زیاد مثلاً $I_D = 52\ mA$ خواهیم داشت :

$$r_d = \frac{26}{52} + 2 = 0.5 + 2 = 2.5\ \Omega$$

بطور کلی ملاحظه میشود مقدار مقاومت r_B در مقایسه با دیود سیلیکی r_d موثر است ولی تاثیر آن در جریان نقطه کار زیاد، مثلاً زیاد میباشد. همانطور که گفته شد مقدار r_B بستگی به نوع دیود دارد و میتوان برای آن مقدار متوسط $2\ \Omega$ در نظر گرفت. ولی معمولاً در حل مسائل بهترین حالت برابر r_B در نظر گرفته و مقدار آنرا برابر $2\ \Omega$ قرار داد. همانطور که گفته شد تاثیر این مقاومت در جریان های کم دیود زیاد میباشد و فقط برای جریانهای زیاد مورد خواهد بود.

حل مدارهای سیگنال کوچک

برای حل مدارهای سیگنال کوچک میتوان از مقاومت دینامیکی دیود استفاده نمود. برای اینمنظور ابتدا منبع ولتاژ dc را در نظر گرفته و با بدست آوردن مدار معادل dc، نقطه کار را تعیین میکنیم (در اینحالت ولتاژ ac اتصال کوتاه در نظر گرفته میشود). با استفاده از جریان نقطه کار بدست آمده از حالت dc میتوان مقاومت دینامیکی دیود را تعیین نمود و سپس مدار معادل ac را رسم کرد. برای بدست آوردن مدار معادل ac، منبع dc را اتصال کوتاه فرض نموده و دیود را با مقاومت دینامیکی آن جایگزین میکنیم. با استفاده از این مدار، جریان مدار و یا سایر متغیرهای مدار را با ورود سیگنال ac تعیین میکنیم. در اینحالت ولتاژ کل دو سر دیود و یا جریان کل مدار مجموع حالتهای ac و dc میباشد.

مثال ۵-۱ : مثال ۴-۱ را با استفاده از روش فوق حل کنید.

حل : مدار معادل dc در شکل الف ۳۶-۱ و مدار معادل ac در شکل ب ۳۷-۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل الف ۳۶-۱ و با در نظر گرفتن حل مثال ۳-۱ میتوان نقطه کار را تعیین نمود. داریم :

$$I_D = I_Q = 7.1\ mA$$

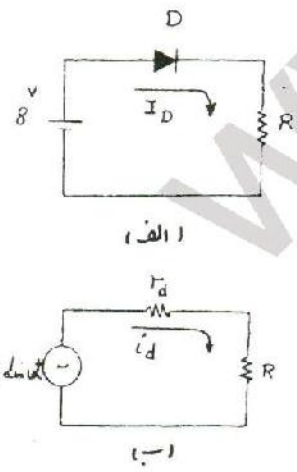
$$V_D = V_Q = 0.9\ V$$

$$V_R = 8 - 0.9 = 7.1\ V$$

با قرار دادن $I_D = 7.1\ mA$ در رابطه (۱-۲۵) خواهیم داشت :

$$r_d = \frac{26}{I_D} + r_B = \frac{26}{7.1} + 2 = 5.66\ \Omega$$

حال با در نظر گرفتن مدار شکل ب ۳۶-۱ ولتاژ ac خروجی بدست میآوریم :



شکل ۳۶-۱ : مدار معادل مثال ۵-۱ :

الف) مدار معادل dc ؛ ب) مدار معادل ac.

www.tnar.ir

$$i_d = \frac{v_i}{r_d + R} = \frac{0.5 \sin \omega t}{1000 + 5.66} = 0.497 \times 10^{-3} \sin \omega t$$

$$v_o = R\, i_d = 0.497 \sin \omega t \quad V$$

ولتاژ کلی خروجی بصورت زیر بدست میآید :

$$v_O = v_o + V_o = 7.1 + 0.497 \sin \omega t \quad V$$

نظر به مطالب مرتبط این نتیجه با نتیجه بدست آمده در مثال ۴-۱ انطباق دارد .

۱-۱۵ : تجزیه و تحلیل سیگنال بزرگ[1] - تقریب خطی - تکه‌ای[2] مشخصه

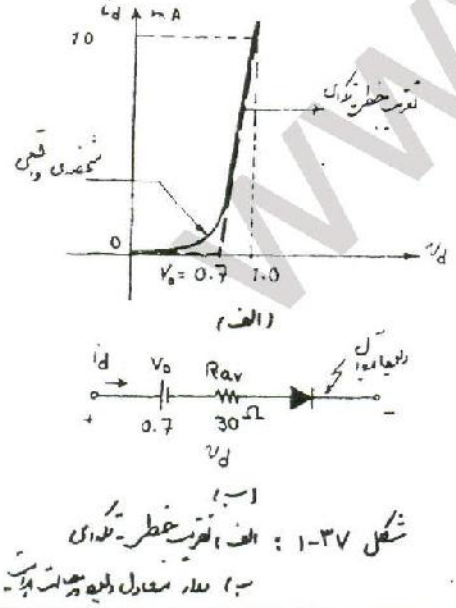
در حالتی که دامنه ولتاژ متناوب در مدار دیود زیاد باشد ، نظریه دیود ساده‌تر و بسیار از مشخصه واقعی کار آمدتر ، و در نتیجه بعلت غیرخطی بودن ماهیت عملکرد دیود ، برای تجزیه و تحلیل مدار باید از تقریب‌های استفاده نمود . چنین روشی را تجزیه و تحلیل سیگنال‌های بزرگ می‌نامند .

در تجزیه و تحلیل سیگنال‌های بزرگ ، معمولاً برای دیود از مدار معادل استفاده می‌شود . یک مدار معادل المانهای مختلف مدار را در برای نشان دادن کارکرد تقریبی یک عنصر یا یک سیستم نگاه می‌دارد . بنابراین این مدار می‌تواند عنصر مورد نظر را برداشته و برای حل سایر مربوط بتوان ، این مدار معادل را جایگزین عنصر غیرخطی نمود .

یکی از روشهای بدست آوردن مدار معادل برای یک دیود ، تقریب تکه‌ای آن توسط خطوط مستقیم نظیر شکل ۱-۳۷ است . چنین مدار معادلی را مدار معادل خطی - تکه‌ای[3] می‌نامند . در بسیاری از استفاده از تقریب خطی برای مشخصه دیود ، مدار معادل کاملاً نظیر مشخصه دیود نخواهد بود ، ولی حداقل برای توصیف رفتار دیود ، تقریب خوبی می‌تواند نگاشته شود . در هر صورت ، مقاومت استاتیکی بدست برای حالت بایاس مستقیم دیود ، یک مقاومت مساوی است در توسط المانهای زیر تقریب می‌شود :

$$R_{av} = \left. \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \right|_{pt\text{-}to\text{-}pt} \qquad (1\text{-}26)$$

مقدار r_{av} برای هر دیود را می‌توان از روی مقادیر عددی داده شده در اوراق داده‌ها[4] در توسط سازندگان دیود‌ها تعیین کرد .



شکل ۱-۳۷ : الف) تقریب خطی - تکه‌ای
ب) مدار معادل دیود در حالت بایاس مستقیم

---

(1) Large - Signal analysis
(2) piecewise - linear approximation
(3) piecewise - linear equivalent circuit
(4) data sheets

www.tiran.ir

در بایاس مستقیم استفاده از مشخصه لازم خواهد بود. به عنوان مثال برای دیود سیلیکن اگر در $I_F = 10\ mA$ ، $V_F = 1\ V$ باشد، در بایاس مستقیم با فرض اینکه ولتاژ آستانه (ولتاژ آغاز هدایت) دیود سیلیکن $0.7\ V$ است مقاومت خواهیم داشت:

$$R_{av} = \frac{1-0.7}{10\ mA} = \frac{0.3}{10} = 30\ \Omega$$

اگر این مقدار برای دیود $V_D = 0.3\ V$ باشد خواهیم داشت:

$$R_{av} = \frac{1-0.3}{10\ mA} = \frac{0.7}{10} = 70\ \Omega$$

در شکل ۱-۳۷ در بخش مشخصه تقریب شده مدار معادل تقریب تر برای حالت هدایت مستقیم رسم شده است. مدار علاوه بر مقاومت و منبع ولتاژ معادل، یک دیود ایده‌آل نیز اضافه شده است تا جهت هدایت را نشان دهد و این مشخص می‌کند که برای حالتی که دیود در بایاس مستقیم گرفته، در بایاس معکوس حالت مدار باز برای دیود اتفاق خواهد افتاد.

چون ولتاژ دو سر دیود سیلیکن تقریباً از $0.7\ V$ بالاتر نرود، جریان دیود بسیار محدود خواهد بود، لذا در مدار معادل این دیود علاوه بر مقاومت R_{av} یک منبع $V_0 = 0.7\ V$ نیز افزوده شده تا این اثر مشخص گردد. افزودن V_0 باعث می‌شود که در تحلیل ولتاژ دو سر دیود از V_0 افزوده نشود. جریانی در مدار برقرار نشود.

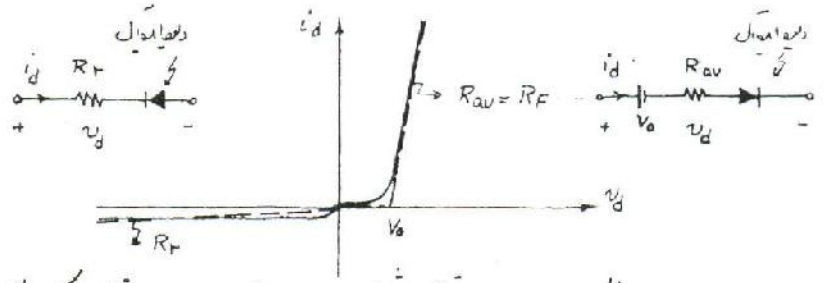
هنگامی که دیود در بایاس معکوس گرفته در بایاس معکوس می‌توان مشخصه‌ی دیود را به جهت معکوس نیز تقریب زد. برای تقریب مشخصه در این قسمت می‌توان از یک مقاومت استفاده کرد، مقدار این مقاومت نیز از طریق رابطه (۱-۲۶) بدست می‌آید.

$$R_r = \frac{\Delta V_r}{\Delta I_r} \qquad (۱-۲۷)$$

البته برای مشخص دیود دیتاشیت اطلاعات اولیه‌ای را در اختیار ما قرار می‌دهد که می‌توان این مقاومت را نیز بدست آورد. به عنوان مثال اگر برای یک دیود سیلیکن در نقطه‌ای $V = -10\ V$ ، $I_r = -5\ \mu A$ باشد در بایاس معکوس خواهیم داشت:

$$R_r = \frac{10}{5 \times 10^{-6}} = 2\ M\Omega$$

بنابراین یک مدل مناسب برای این دیود در ناحیه‌ی بایاس معکوس یک مقاومت $2\ M\Omega$ است. شکل ۱-۳۸ تقریب خطی مشخصه یک دیود را در مناطق هدایت و قطع همچنین مدار معادل هرکدام از مناطق را نشان می‌دهد.

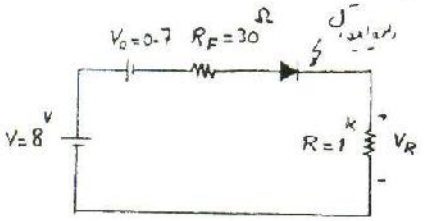


شکل ۱-۳۸ : تقریب مشخصه دیود در دو ناحیه‌ی هدایت مستقیم و معکوس آن.

مثال ۶-۱ : مثال ۳-۱ را با استفاده از روش تقریب خط‌ـ شکسته حل کنید .

حل : اگر مشخصه دیود مثال ۳-۱ را بصورت شکل الف ۳۷-۱ تقریب بزنیم ، در نتیجه مدار معادل شکل ب ۳۷-۱ مدار شکل ۳۲-۱ ، مدار شکل ۳۹-۱ نتیجه میشود .

$V_0 = 0.7^{V}$, $R_F = R_{av} = 30^{\Omega}$



شکل ۳۹-۱ : مدار معادل شکل ۳۲-۱ .

با توجه به جهت گذاری دیود در مدار مقدار زیر بدست آوریم :

$$V_R = \frac{1}{1.030}(8 - 0.7) = 7.087 \simeq 7.1^{V}$$

در اینجا اگر جریان دیود و ولتاژ دوسر آنرا بدست آوریم .

جریان هم داریم :

$$I_D = \frac{8 - 0.7}{1.030} = 7.087 \simeq 7.1^{mA}$$

$$V_D = 8 - 7.087 = 0.913 \simeq 0.9^{V}$$

ملاحظه میشود که این مقادیر ، با مقادیر بدست آمده در مثال ۳-۱ تقریباً برابر است .

در مثال فوق اگر از مقاومت 30^{Ω} دیود در مقابل مقاومت $1^{k\Omega}$ ، صرف نظر کنیم در اینصورت منبع ولتاژ خواهیم داشت .

$$V_R = 7.3^{V}$$

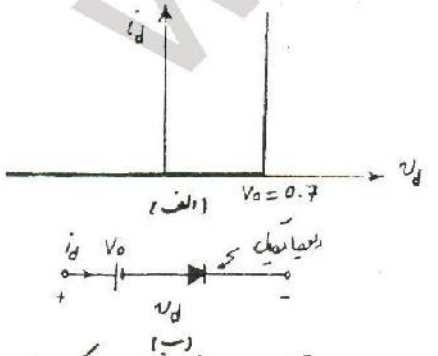
$$I_D = 7.3^{mA}$$

$$V_D = 0.7^{V}$$

همانطور که ملاحظه میشود با بکار بردن این تقریب مقدار بدست آمده ، کوچک بوده و قبلی دیود و مقاومت جداگانه دارند (برای ولتاژ V_R خطای ناشی از این تقریب 2.8 % است) . بنابراین مشاهده میشود که در بعضی موارد میتوان مشخصه دیود را بصورت شکل ۴۰-۱ تقریب زد و در این نقطه ولتاژ آستانه دیود را در نظر گرفت .

معمولاً برای تجزیه و تحلیل مدارهای دیودی این تقریب بکار میرود .

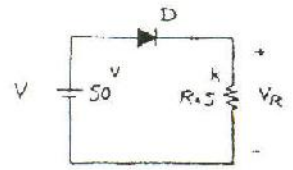
این تقریب ، بیان میکند که اگر دیود سیلیکن در یک سیستم الکترونیکی بصورت مستقیم با بایس شود ، افت ولتاژ دو سر آن همواره 0.7^{V} خواهد بود و جریان از مدار آن عبور میکند .



شکل ۴۰-۱ : الف) تقریب دوم مشخصه دیود سیلیکن ؛ ب) مدار معادل آن (دوم)

www.tmar.ir

مثال ۷-۱ : با استفاده از تقریب قطعه ای دیود به سوال داده شده در شکل ۱-۳۷ ، ولتاژ دو سر و جریان دیود را برای مدار شکل ۱-۴۱ بدست آورید .



شکل ۱-۴۱ : مدار مثال ۷-۱ .

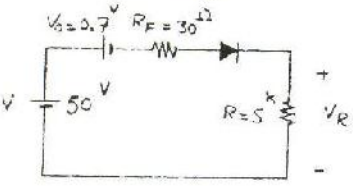
حل : با جایگزین کردن دیود D در مدار شکل ۱-۴۱ توسط مدار معادل شکل ب ۱-۳۷ ، شکل ۱-۴۲ بدست خواهد آمد .

با توجه به این شکل می توان نوشت :

$$V_R = \frac{(50-0.7)\times 5}{5.03} = 49.006 \approx 49 \ V$$

$$I_D = \frac{50-0.7}{5.03} = 9.8 \ mA$$

$$V_D \approx 1 \ V$$



شکل ۱-۴۲ : مدار معادل شکل ۱-۴۱ .

حال اگر از مقاومت $30\ \Omega$ در مقابل مقاومت $5\ k\Omega$ صرف نظر نماییم در این صورت خواهیم داشت :

$$V_R = \frac{50-0.7}{5} \times 5 = 49.3 \ V$$

$$I_D = \frac{50-0.7}{5} = 9.86 \ mA$$

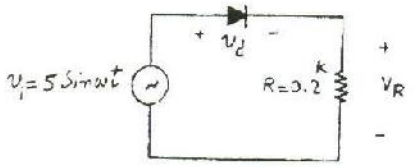
با توجه به ابعاد بدست آمده در مثال مشخص می شود که استفاده از تقریب شکل ۱-۴۰ خطای بدست آمده برای محاسبه ولتاژ خروجی 0.6 % می شود . در این مدار می توان با استفاده از تقریب دیود ایده آل نتیجه مشابه را حاصل نمود . در این حالت خواهیم داشت :

$$V_R = 50 \ V$$

$$I_D = 10 \ mA$$

مشاهده می شود که در این حالت خطای ناشی از تقریب بکار برده شده در حدود 2 % است . بنابراین نتیجه می شود که در بکار بردن دیود در یک مدار می توان از تقریب های مختلف متناسب با شرایط استفاده نمود .

مثال ۸-۱ : برای مدار نشان داده شده در شکل ۱-۴۳ ، با استفاده از تقریب مشخصه شکل ۱-۳۷ ، ولتاژ خروجی را بدست آورید .

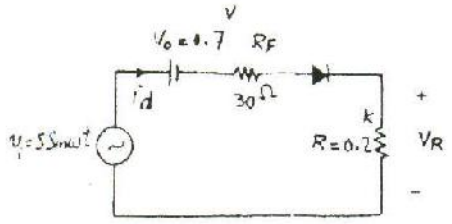


شکل ۱-۴۳ : مدار مثال ۸-۱ .

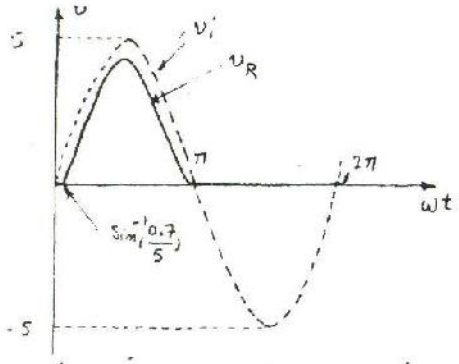
حل : با استفاده از تقریب مشخصه دیود ، مدار معادل مدار شکل ۱-۴۳ را می توان بصورت شکل ۱-۴۴ نوشت .

با توجه به شکل ۱-۴۴ مشاهده می شود ، تا زمانی که ولتاژ ورودی به مقدار 0.7 V نرسد دیود هادی نخواهد گشت .

www.ttnar.ir



شکل ۱-۴۴ : مدار معادل شکل ۱-۴۳.



شکل ۱-۴۵ : شکل ولتاژ ورودی و خروجی مدار شکل ۱-۴۳.

تا زمانی که ولتاژ ورودی کمتر از 0.7 V جریان در مدار صفر است و ولتاژ خروجی نیز صفر خواهد بود. زمانی که $v_i > 0.7$ V دیود روشن است و جریان از آن عبور می‌کند. در این حالت خروجی از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$v_i < 0.7 \text{ V} \qquad v_R = 0$$

$$v_i > 0.7 \qquad v_R = \frac{200}{230}(v_i - 0.7)$$

$$v_R = \frac{200}{230}(5\sin\omega t - 0.7)$$

$$= 4.35\sin\omega t - 0.61$$

شکل ولتاژ خروجی مدار در شکل ۱-۴۵ رسم شده است.

چنان که این نوع مدارها در ورودی‌های بزرگ تغییر می‌کنند، استفاده از تقریب خط‌به‌تکه‌ای نتیجه‌ی نسبتاً خوبی می‌دهد. ولی استفاده از این تقریب برای بررسی عملکرد سیگنال کوچک مناسب نیست. به‌عنوان مثال فرض می‌کنیم در جریان dc مدار دیود در حدود سیگنال کوچک نیز حدوداً برابر 10 mA است. در این صورت مقاومت دینامیکی دیود را می‌توان از رابطه (۱-۲۵) به دست آورد:

$$r_d = \frac{26}{I_D} + 2 = \frac{26}{10} + 2 = 4.6\ \Omega$$

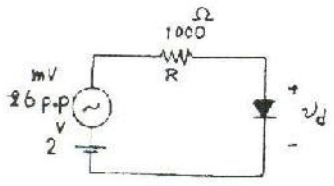
اگر جریان I_D برابر 0.5 mA باشد در این صورت خواهیم داشت:

$$r_d = \frac{26}{I_D} + 2 = \frac{26}{0.5} + 2 = 52 + 2 = 54\ \Omega$$

حال نسبت به این که دیود در کدام ناحیه از مشخصه کار کند، استفاده از تقریب $R_{av} = 30\ \Omega$ برای حل مدارهای سیگنال کوچک بارقیق خواهد بود. بنابراین برای حل مدارهای سیگنال کوچک در حدود یک سیگنال با دامنه‌ی کم روی یک مقدار dc سوار شده است، مرسوم جریان dc دیود را با استفاده از تقریب مناسب (مشخصه خطی یا دیود ایده‌آل) به دست آورده و سپس با استفاده از رابطه (۱-۲۵) مقاومت دینامیکی دیود را تعیین نموده و در مدار معادل dc جایگزین دیود نمود.

مثال ۹-۱ : ولتاژ v_d دو سر دیود را برای مدار شکل ۱-۴۶ به دست آورید.

حل: ابتدا مدار معادل dc را رسم می‌کنیم. در این مدار جای دیود را مشخصه تقریب شده آن استفاده می‌نماییم (در اینجا مشخصه دیود ایده‌آل با ولتاژ آستانه‌ی دیود تقریب شده با یک باتری). مدار معادل به شکل



شکل ۱-۴۶ : مدار مثال ۹-۱.

www.tfnar.ir

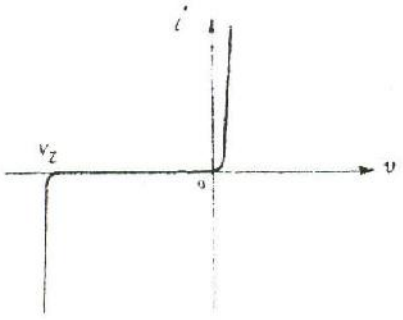
با افزایش ناخالصی ۷ عددی مربوط به حاصل از میدان الکتریکی ، یکی از مواردی که ولتاژ شکست را تغییر می‌دهد . با افزایش غلظت ناخالصی در ولتاژ شکست برای آن نوع دیود تقریباً ثابت می‌ماند یعنی با افزایش دما ظرفیت در کریستال تغییر چندانی نمی‌کند ، بلکه تعداد بیشتری از پیوند ظرفیتی شکسته شده و جریان دیود افزایش می‌یابد . آزمایش نشان می‌دهد که ضریب حرارتی ولتاژ شکست برای این نوع دیود منفی است یعنی با افزایش دما ولتاژ شکست کاهش می‌یابد . این پدیده نیز با مکانیسم قوی ناهمگنی است زیرا با افزایش دما بر حرکت الکترون‌ها نیز ظرفیت پیوند ، پیوند کووالانسی بیشتر می‌شود . بنابراین دیود با ولتاژ کمتری شکست می‌خورد (انرژی باند ممنوع برای سیلیکون و ژرمانیم در دمای حرارت صفر مطلق ترتیب 1.21 و 0.785 الکترون ولت است ، در دمای حرارت $300^{\circ}K$ این انرژی برای سیلیکون 1.1^{ev} و برای ژرمانیم 0.72^{ev} خواهد شد) . ثابت می‌شود که میدان الکتریکی لازم برای این دیود نیز در حدود $2\times10^{7}V/m$ است . این مقدار برای دیودی که در آن غلظت حامل‌ها خیلی زیاد است و ولتاژ شکست کمتر از 6^{V} ایجاد می‌شود . برای دیودی که دارای غلظت حامل کمتری هستند ولتاژ شکست زیاد است و دیود دیگر برای شکست بهمنی مورد استفاده قرار می‌گیرد (قبل از شکست زنر) در زیر به بررسی آن می‌پردازیم .

مکانیسم دیگری که برای پدیده شکست ذکر می‌شود ، مکانیسم شکست بهمنی[1] است . این مکانیسم در مورد دیودی که در ولتاژ شکست آنها بیشتر از 6^{V} است صادق می‌باشد . در این دیودها غلظت کم ناخالصی ، عرض منطقه بار فضا زیاد و میدان الکتریکی کافی برای شکستن پیوند کووالانسی لازم فراهم می‌آید ، بلکه حاملهای اقلیتی که بواسطه انرژی حرارتی آزاد می‌شوند ، در اثر میدان الکتریکی شتاب گرفته و انرژی جنبشی کافی بدست آورده و در منطقه بار فضا با الکترون‌های کریستال برخورد کرده و در نتیجه پیوندهای کووالانسی را می‌شکنند . با شکستن هر پیوند حاملهای جدیدی ایجاد شده که خود باعث شکستن پیوندهای بیشتر می‌شود . بدین ترتیب پیوندها بطور تصاعدی یا بهمنی شکسته می‌شوند و این باعث می‌شود که ولتاژ در دو سر دیود تقریباً ثابت مانده و جریان آن افزایش یافته و بواسطه‌ی مدار خارجی محدود می‌شود . چنین دیودهایی دارای ضریب درجه حرارت مثبت هستند . زیرا با افزایش درجه حرارت اتمهای متشکله کریستال با ارتعاش درآمده ، در نتیجه احتمال برخورد حاملهای اقلیت با الکترون ، بیشتر شده ، بنابراین بار فضا زیادتر می‌گردد . علت زیاد شدن برخورد‌ها این است که انرژی جنبشی حفره یا الکترون بین دو برخورد متوالی مقدار لازم برای شکست پیوند را کمتر می‌کند در نتیجه ولتاژ شکست افزایش می‌یابد .

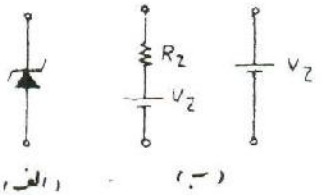
مشخصه دیود زنر

در شکل ۵۰-۱ مشخصه یک دیود زنر نشان داده شده است . همانطور که ملاحظه می‌شود در منطقه شکست با افزایش جریان ولتاژ دو سر دیود تقریباً ثابت می‌ماند . ولتاژ زانو در حالت بایاس معکوس تغییر کرده ، ولتاژ شکست نامیده و با V_Z نشان می‌دهند . همانطور که قبلاً گفته شد با کنترل مقدار غلظت ناخالصی در دیود ، می‌توان مقدار V_Z را تغییر داد . با افزایش مقدار غلظت V_Z

(1) avalanche breakdown



شکل ۱-۵۰ : مشخصه ی ولت-آمپر دیود زنر .



شکل ۱-۵۱ : الف) علامت مداری دیود زنر ؛
ب) مدار معادل دیود زنر .

کاهش می یابد .

دیودهای زنری که در عمل بکار برده می شوند ، دارای ولتاژ شکست بین 2 تا 200 ولت بوده و با توانهای محدود $\frac{1}{4}^{W}$ ، 50^{W} مورد استفاده قرار می گیرند . قیمت کمتر حساسیت و جریان زیاد معمولاً برای ساختن دیودهای زنر از نیمه رساناهای سیلیکن استفاده می شود .

قبل از مشخص دیود زنر شایان توجه می باشد که مشخصه ی این دیود با ترمیستور ، از نظر دیود معمولی ، یک تفاوت و یک منبع ولتاژ (در ناحیه ی شکست) تقریب بهتر . برای بعضی از کاربردهای دیود زنر ، مقاومت کوچک دیود نیز در مقدار مقاومت منبع خارجی در نظر گرفته می شود . دیود زنر به صورت یک منبع ولتاژ ایده آل با ولتاژ V_Z تقریب بهتر . معادله ی مداری دیود زنر در تقریب دوم بکار رفته در مورد مشخصه ی آن دیود در شکل ۱-۵۱ نشان داده شده است .

۱-۱۷ : مشخصات دیود زنر (داده شده توسط سازنده)

برای مشخص کردن عملکرد دیودهای زنر ، تعدادی از پارامترهای آن دیود توسط کارخانه سازنده داده می شود که در اینجا به آنها اشاره می شود : (مقادیر داده شده برای دیود 1N2816 می باشد) .

۱ - ولتاژ مبنای اسمی[1] $V_{ZT} = 18^{V}$

۲ - تولرانس[2] 5%

۳ - ماکزیمم توان تلف شده (در دمای محیط $25^{\circ C}$) 50^{W}

۴ - جریان نقطه آزمایش شده[3] $I_{ZT} = 700^{mA}$

۵ - مقاومت دینامیکی در I_{ZT} ، $r_{zt} = 2^{\Omega}$

---

(1) nominal reference voltage
(2) tolerance
(3) test current

www.tnar.ir

۶ - جریان زانو[1] $I_{ZK} = 5\ mA$

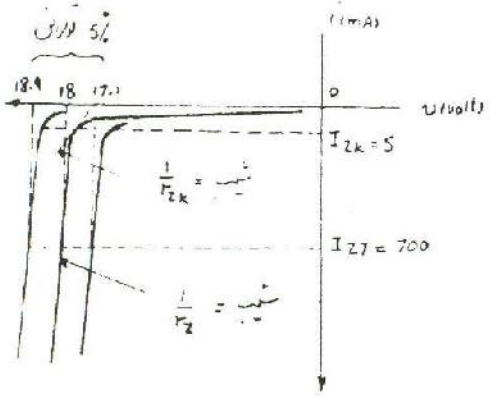
۷ - مقاومت دینامیکی زانو $r_{ZK} = 80\ \Omega$

۸ - ماکزیمم دمای مجاز حرارت پیوند $T_{j_{max}} = 150\ ^{\circ}C$

۹ - ضریب حرارتی[2] $TC = 0.075\ \%/^{\circ}C$

این مشخصات را می‌توان با توجه به شکل ۱-۵۲ کاملاً توضیح داد.

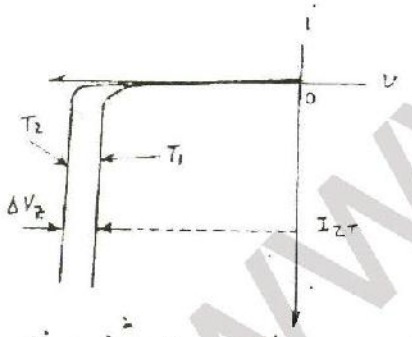
روی این شکل مشخصات ۱، ۲ و ۴ بخوبی نشان داده شده‌اند. پایداری ولتاژ ۵٪ تلرانس برای ولتاژ شکست، این پارامتر می‌تواند بین مقادیر $17.1\ V$ و $18.9\ V$ قرار گیرد. ماکزیمم توان تلف شده (مشخصه ۳) حداکثر توانی است که دیود در دمای محیط معمولی ($25^{\circ}C$) می‌تواند تلف کند، نشان می‌دهد. مقاومت دینامیکی عبارتست از شیب بخش مشخصه در نقطه I_{ZT}. ماکزیمم دمای مجاز حرارت پیوند (مشخصه ۸) ماکزیمم دمایی است که دیود می‌تواند بدون از دست دادن خواص حرارتی کار کند. ضریب حرارتی (مشخصه ۹) را می‌توان با توجه به شکل ۱-۵۳ توضیح داد. در جریان معمولی و برای ولتاژ شکست بالاتر از $6\ V$، افزایش دمای مجاز حرارت باعث افزایش ولتاژ شکست می‌شود. برای شخص کردن نسبت افزایش این ولتاژ با پارامتر ضریب حرارتی داریم:



شکل ۱-۵۲ : مشخصات دیود زنر IN2816.

$$TC\ \% = \frac{\Delta V_Z / V_{ZT}}{T_2 - T_1} \times 100\ \%/^{\circ}C \qquad (1-28)$$

برای یک دیود، افزایش $50^{\circ}C$، ولتاژ شکست را بصورت زیر تغییر خواهد داد:



شکل ۱-۵۳ : تاثیر دمای حرارت بر مشخصات دیود زنر.

$$\frac{\Delta V_Z}{V_{ZT}} = (0.075\ \%/^{\circ}C) \times 50^{\circ}C = 3.75\ \%$$

بنابراین:

$$\Delta V_Z = (0.0375)(18) = 0.67\ V$$

$$V_Z \simeq 18.7\ V$$

---

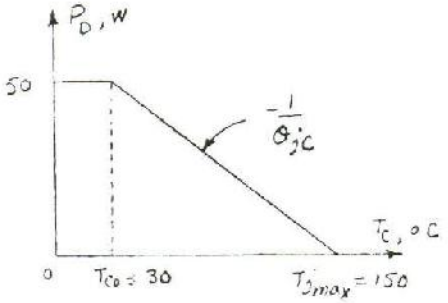
(1) Knee Current

(2) Temprature Coefficient

www.tinar.ir

همانطور که قبلاً گفته شد برای دیودهای زنر با ولتاژ کمتر از تقریباً ۶ ولت ضریب حرارتی معمولاً منفی است ولی برای دیودهای با ولتاژ شکست بیشتر از ۶ ولت این نقطه از یک نقطه که در آن ضریب حرارتی دیود صفر می‌شود.

نکته دیگری که باید بدانید این است که توان تلف شده‌ای که ما در دیود داریم این پارامتر معمولاً برای دمای محیط حرارت معمولی مثلاً $25^{\circ}C$ مشخص می‌شود. اگر دمای محیط یا حرارت کار دیود را بالا ببریم در اینصورت مقدار توان تلف شده مجاز دیود کاهش می‌یابد و مقدار این کاهش بستگی به مقاومت حرارتی دیود (θ_{jc}) دارد. معمولاً سازنده‌ها در اوراق داده‌ها منحنی مربوط به این کاهش را به عبارت دیگر منحنی دریتینگ دیود را مشخص می‌کنند. منحنی دریتینگ مربوط به دیود IN2816 در شکل ۵۴-۱ نشان داده شده است.



شکل ۵۴-۱ : منحنی دریتینگ دیود زنر IN2816.

www.ttnar.ir

فصل ۲

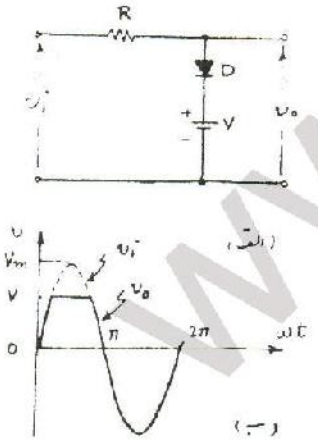
کاربردهای دیود

۲-۱ : مقدمه

در این فصل ابتدا به بررسی کاربرد دیود در مدارهای شکل دهنده موج[1] یکسو کننده[2] و مدارهای برش و گیرش[3] دیود می‌پردازیم. همچنین کاربرد یکسو کننده‌گی دیود در این بخش بررسی شده و انواع آن در منابع تغذیه جهت تبدیل ولتاژ ac به dc که بدون آن سوئیچ مغز متفکر می‌شود. مدارات یکسو کننده مستقیماً از منبع متصل نمی‌شوند بلکه توسط فیلتر خازنی نیز مورد مطالعه قرار گرفته و سپس کاربرد دیود به عنوان تثبیت کننده ولتاژ بررسی می‌گردد.

۲-۲ : مدارهای برش

اساس کلیه مدارهای برش برای انتخاب قسمتی از شکل موج ورودی بکار می‌رود که در زیر و یا بالای ولتاژ مبنای خاصی قرار می‌گیرد. در شکل ۲-۱ چنین مداری همراه با شکل موج ولتاژ خروجی آن نشان داده شده است.



شکل ۲-۱ : الف) مدار برش مثبت ؛
ب) شکل موج خروجی مدار شکل الف وقتی ورودی سینوسی.

در مدار فوق دیود D با ولتاژ آستانه V_γ فرض گردیده و ورودی آن یک ولتاژ سینوسی در نظر گرفته می‌شود که دامنه آن از مقدار ولتاژ V بیشتر است. هنگامی که دامنه ولتاژ ورودی کمتر از V باشد، دیود D قطع شده و در نتیجه جریان مدار صفر خواهد شد. در نتیجه در این حالت ورودی بیشتر از V گفته (در جهت مثبت)، در این صورت دیود هادی شده و مدار مستقیم بایس شده و اختلاف

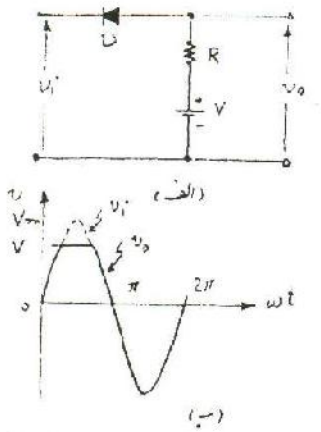
---

(1) Wave shaping circuits
(2) clipping circuits
(3) clamping circuits

www.ttnari.ir

ولتاژ بین ورودی و منبع تغذیه V روی مقاومت R افت کرده و درنتیجه خروجی در سطح V ثابت خواهد ماند .

بنابراین عملکرد مدار برش مثبت شکل الف ۲-۱ را میتوان به‌طور کلی خلاصه نمود : هنگامیکه ولتاژ ورودی (V) بزرگتر از ورودی باشد ، ولتاژ خروجی عیناً ولتاژ ورودی را دنبال کرده (در نهایت دیود بطور معکوس بایاس می‌شود) و زمانی که ولتاژ ورودی از V بیشتر شود ولتاژ خروجی در V ثابت می‌ماند (دیود بطور مستقیم بایاس می‌شود) .

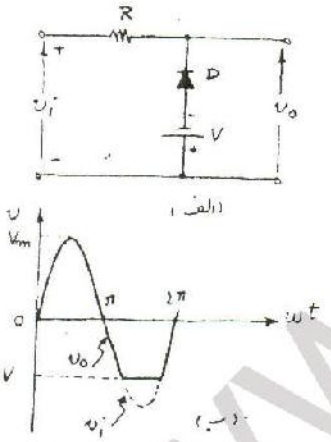


شکل ۲-۲ : الف) شکل دیگری از مدار برش مثبت ؛
ب) شکل موج خروجی برای ورودی سینوسی .

شکل دیگری از مدار برش مثبت در شکل ۲-۲ همراه با شکل ولتاژ خروجی آن رسم شده است . در این مدار نیز ملاحظه میشود که برای ورودی کمتر از V دیود D در جهت مستقیم بایاس شده و مدار است خواهد شد و بنابراین با اتصال کوتاه شدن آن ، شکل ولتاژ ورودی عیناً در خروجی ظاهر میشود . برای دامنه‌های ورودی بیشتر از V دیود بطور معکوس بایاس شده و با قطع شدن جریان مدار ولتاژ خروجی در سطح V ثابت خواهد ماند .

هرگاه در مدار شکل ۲-۱ جهت دیود و پلاریته‌ی[1] منبع ولتاژ عوض شود مدار شکل ۲-۳ نتیجه میشود که مدار برش منفی است ، یعنی شکل ولتاژ خروجی آن مدار در یک سطح منفی بریده شده و ثابت میماند .

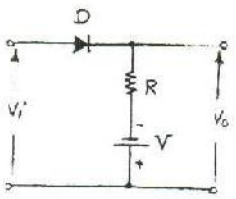
در این مدار ، بعلت وصل بودن آند دیود D به ولتاژ منفی V ، تا زمانی که دامنه‌ی ولتاژ ورودی از V- بیشتر است (مثبت تر است) ، این دیود قطع است و ولتاژ ورودی عیناً در خروجی ظاهر میشود . به ازای دامنه‌های ورودی منفی تر از V- دیود D بطور مستقیم بایاس شده و دیگر مدار است خواهد بود . در این حالت بعلت اتصال کوتاه دو سر آن ، ولتاژ خروجی در سطح ولتاژ منبع V- ثابت خواهد ماند . شکل ۲-۴ شکل دیگری از مدار برش منفی را نشان میدهد که در آن جهت دیود و ولتاژ منبع تغییر کرده است .



شکل ۲-۳ : الف) مدار برش منفی ؛
ب) شکل موج خروجی برای ورودی سینوسی .

مدارهای برش دیگر

در شکل ۲-۵ تا ۲-۸ چهار مدار برش دیگر ، همراه با شکل موج ولتاژ خروجی آنها نشان داده شده اند . با در نظر گرفتن ملاحظات مشابه برای این مدارها به ترتیب مشابه با مدارهای نشان داده شده در شکل‌های ۲-۱ تا ۲-۴ عمل

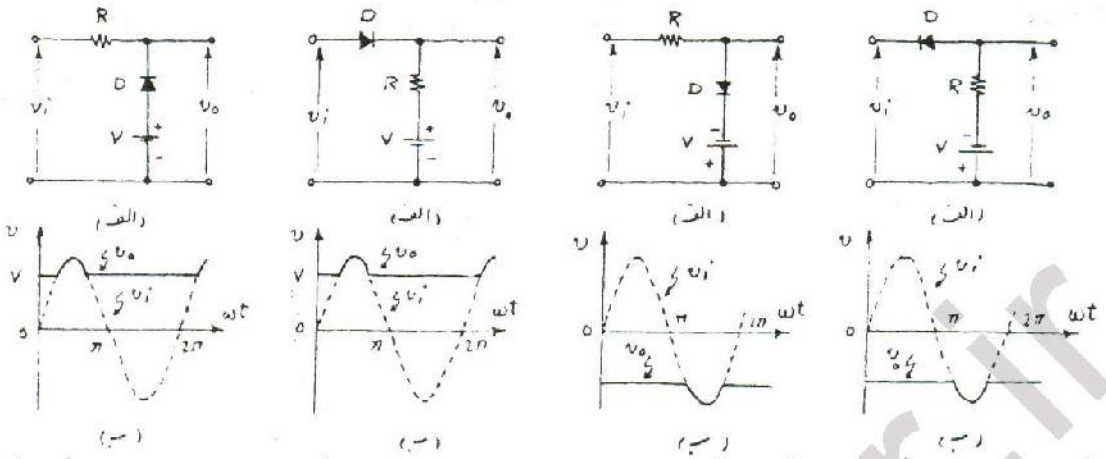


شکل ۲-۴ : شکل دیگری از مدار برش منفی .

---

[1] polarity

و تنها تفاوت آنها در جهت دیود این مدارها است . به همین جهت شکل موج خروجی این مدارها مانند شکل موج مدارهای نشان داده شده در شکل‌های ۱-۲ تا ۴-۲ میباشد . بررسی عملکرد این مدارها به عنوان تمرین به عهده دانشجویان واگذار میشود .



شکل ۲-۸ : الف) مدار برش منفی
ب) شکل موج خروجی .

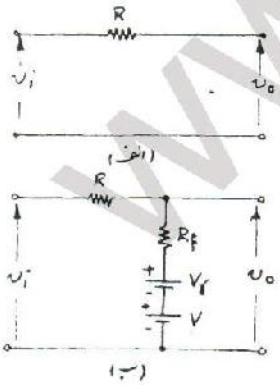
شکل ۲-۷ : الف) مدار برش مثبت
ب) شکل موج خروجی .

شکل ۲-۶ : الف) مدار برش مثبت
(شکل انگیز) :
ب) شکل موج خروجی .

شکل ۲-۵ : الف) مدار برش مثبت
ب) شکل موج خروجی .

بررسی مدار برش با استفاده از مشخصه‌ی انتقالی دیود

در بررسی‌های قبلی دیود را ایده‌آل در نظر گرفتیم . حال به بررسی مدار برش شکل ۱-۲ با استفاده از مشخصه دیود واقعی می‌پردازیم . بدیهی است در بررسی دقیق‌تر مدارهای الکترونیکی باید از مدل دقیق‌تری استفاده کنیم . با استفاده از مشخصه دیود تکنیک‌های خاصی برای تحلیل مدارهای الکترونیکی بوجود آمده است . مدارهای نشان داده شده در شکل‌های ۹-۲ الف و ۹-۲ ب به ترتیب برای حالت قطع و هدایت دیود بدست می‌آید .



شکل ۹-۲ : مدارهای معادل برای بررسی مدار برش شکل ۱-۲ الف :
الف) مدار معادل برای حالت قطع دیود D :
ب) مدار معادل برای حالت هدایت دیود D .

با توجه به این شکل‌ها مشاهده میشود تا زمانی که ولتاژ ورودی کمتر از $V_\gamma + V$ باشد (در اینجا V_γ ولتاژ مدار معادل از V_γ استفاده شده تا با ولتاژ خروجی اشتباه نشود) دیود D قطع بوده و ولتاژ خروجی برابر ورودی ($v_o = v_i$) خواهد شد . هنگامی که ولتاژ ورودی از مقدار $V_\gamma + V$ بیشتر شود دیود هادی کرده و با توجه به شکل ب ۹-۲ میزان ولتاژ خروجی V_o بدست آورد . بنابراین مشخصه‌ی انتقال[11] یا رابطه بین ولتاژ خروجی و ورودی مدار برش شکل ۱-۲ بصورت زیر درمی‌آید :

الف) $v_o = v_i \qquad v_i \le V + V_\gamma$ (۱-۲)

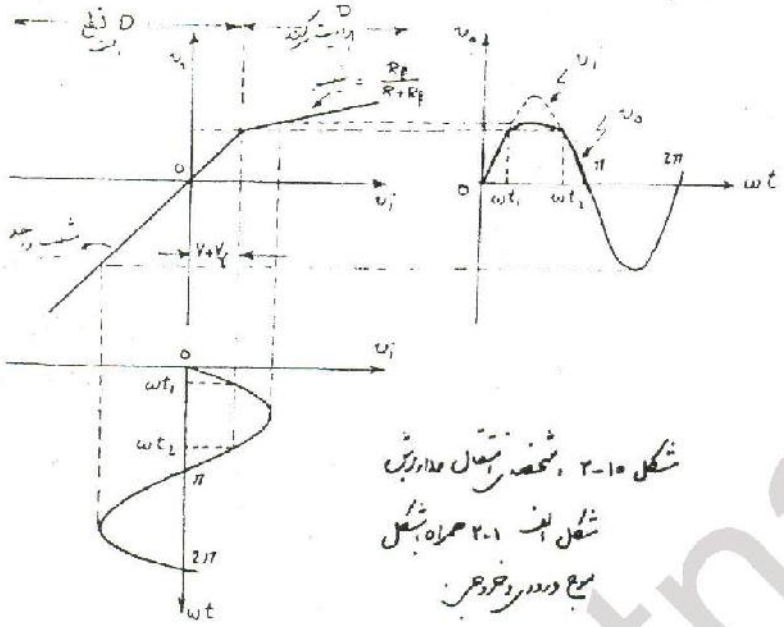
---

11) Transfer characteristic

$$v_i \geq V + V_\gamma \qquad v_o = v_i \frac{R_f}{R + R_f} + (V + V_\gamma)\frac{R}{R + R_f} \qquad (ب\text{-}۱\text{-}۲)$$

مشخصه انتقال این مدار برش همراه شکل موج ورودی و خروجی در شکل ۱۰-۲ رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در حالت ایده‌آل، خروجی در سطح برش کاملاً ثابت نگاه داشته و قسمتی از ولتاژ ورودی روی سطح برش سوار شده است.

اگر $R_f \ll R$ باشد، سطح این قسمت خیلی کم بوده و خروجی در اینجا تقریباً همان سطح برش $V + V_\gamma$ خواهد بود. بنابراین در صورتی که $V_\gamma \ll V$ بوده و در نتیجه می‌توان از ولتاژ دیود صرف‌نظر کرد، سطح برش تقریباً برابر V خواهد بود. بنابراین مدار مشخص شده در شکل ۱۰-۲ را می‌توان به‌طور تقریبی با استفاده از روابط فوق مورد بررسی قرار داد.



شکل ۱۰-۲، مشخصه انتقال مدار برش شکل الف ۱-۲ همراه با شکل موج ورودی و خروجی

در بررسی فوق مدار دیودی، مقاومت قطع دیود بی‌نهایت فرض شده است و این برای حالتی که $R_L \gg R$ باشد تقریب خوبی خواهد بود. در غیر اینصورت باید در محاسبه قطع نیز مقاومت R_L را در نظر گرفت که در این حالت مطابق رابطه (الف ۱-۲) باید نوشت:

$$v_o = \frac{R_L}{R + R_L} v_i \quad \text{قطع}$$

در مدارهای برش برای اینکه مقاومت R تأثیری در سطح برش نداشته باشد و حالت قطع دیود ایده‌آل شبیه باشد، باید مقدار آن خیلی کوچکتر از مقاومت معکوس دیود ($R \ll R_L$) بوده و خیلی نیز بزرگتر از مقدار مقاومت رفت آن ($R \gg R_f$) باشد. در عمل با انتخاب $R = \sqrt{R_L \cdot R_f}$ می‌توان شرایط فوق را تحقق داد.

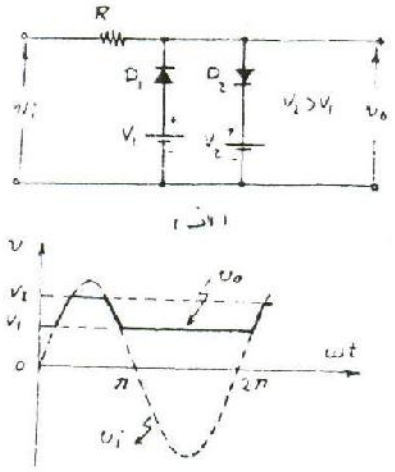
۲-۴ : مدارهای برش در دو سطح

در بسیاری موارد، احتیاج به بریدن یک شکل موج در دو سطح مختلف است. برای چنین منظوری از مدارهای برش در دو سطح[1] استفاده می‌کنیم. با ترکیب مختلف مدارهای برش گفته شده، می‌توان چنین مداری را طرح نمود. در شکل الف ۱۱-۲ مدار برش در دو سطح، نشان داده شده است. در این مدار فرض می‌شود که $V_2 > V_1$ باشد. در این حالت ملاحظه می‌شود تا زمانی که ولتاژ ورودی از V_1 بیشتر،

---

(1) double-ended limiting

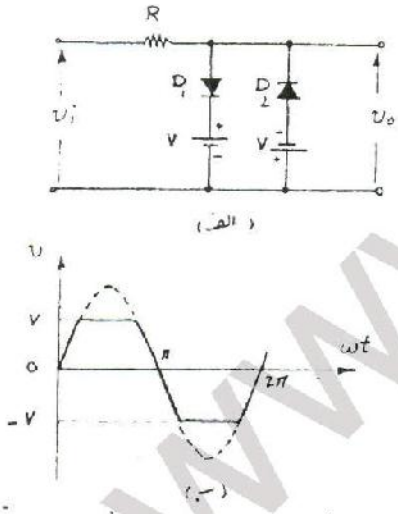
www.ttnar.ir



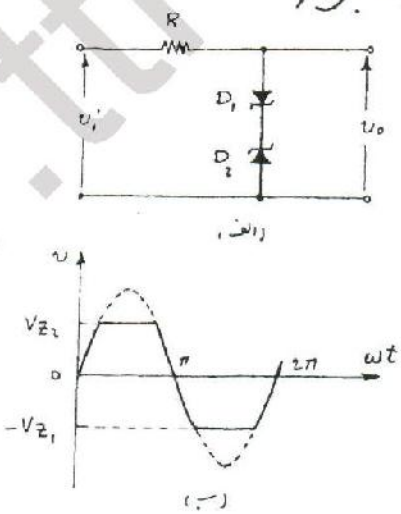
شکل ۱۱-۲ : الف) مدار برش در دو سطح : ب) شکل موج خروجی با ورودی سینوسی .

دیود D_1 بایاست کرده و دیود D_2 قطع خواهد شد . در اینحالت ولتاژ خروجی V_1 در V_1 ثابت خواهد ماند . هرگاه دامنه ولتاژ ورودی از V_1 بیشتر شده و مقدار آن کمتر از V_2 باشد ، در اینصورت هر دو دیود D_1 و D_2 قطع بوده و شکل موج ورودی عیناً در خروجی ظاهر میشود (اثر بار دیود در مدار دوم را نظر گرفته شده اند) . هنگامیکه دامنه ورودی از V_2 نیز بیشتر میشود ، D_1 همچنان در حالت قطع بوده ولی D_2 بایاست خواهد شد . در اینصورت سطح ولتاژ خروجی در V_2 ثابت میماند . بدینترتیب ملاحظه میشود که بوسیله چنین مداری میتوان دامنه ورودی را در دو سطح V_1 و V_2 برش داد .

از چنین مداری برای تبدیل شکل موج سینوسی به شکل موج مربعی[1] نیز استفاده میشود . در اینجا برای تولید یک موج مربعی متقارن میتوان مقادیر V_1 و V_2 را از نظر مقدار با هم برابر و از نظر علامت مخالف هم در نظر گرفت . چنین مداری در شکل الف ۱۲-۲ نشان داده شده است . در این مدار هرگاه دامنه ولتاژ ورودی در مقابل سطح ولتاژ V مقدار خیلی زیادی باشد ، ولتاژ خروجی بصورت مربعی در خواهد آمد .



شکل ۱۲-۲ : الف) مدار برش در دو سطح متقارن ؛ ب) شکل موج ولتاژ خروجی با ورودی سینوسی .



شکل ۱۳-۲ : الف) مدار برش در دو سطح نابرابر ؛ ب) شکل موج ولتاژ خروجی با ورودی سینوسی .

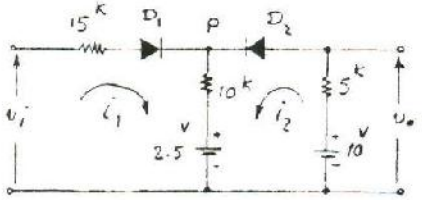
با استفاده از دیود زنر میتوان مدار برش در دو سطح نظیر شکل الف ۱۳-۲ بدست آورد . در اینجا دیودهای D_1 و D_2 با ولتاژ شکست تقاطعات در نظر گرفته شده اند . هنگامیکه دامنه ولتاژ ورودی مثبت باشد ، دیود D_1 بایاست کرده و دیود D_2 بصورت متکوس با بایاس مثبت در اینحالت ورودی عیناً در خروجی ظاهر میشود . اگر دامنه ولتاژ ورودی به اندازه رسید که دیود D_2 به حالت شکست رود ، در اینصورت این دیود بایاس

---

(۱) Squar waveform

کرده و ولتاژ خروجی برسطح V_{Z_2} ثابت می‌ماند (دامنهٔ ولتاژ هدایت دیود D_2 در مقدار ولتاژ شکست V_{Z_2} صرف نظر شده است) . در حالتی که ولتاژ ورودی منفی باشد ، دیود D_2 هدایت کرده و D_1 بصورت معکوس بایاس میشود . دامنهٔ ولتاژ ورودی عنصر خروجی ظاهر میشود تا زمانی که ولتاژ ورودی بقدر مقاومت منفی میشود که ولتاژ دو سر دیود D_1 به حد ولتاژ شکست آن برسد . از این لحظه به بعد دیود D_1 نیز هدایت کرده و خروجی در سطح $-V_{Z_1}$ ثابت می‌ماند .

مثال ۱-۲ : برای مدارنشان داده شده در شکل ۱۴-۲ مشخصه انتقال را بدست آورده و با ازای ورودی $v_i = 30 \sin \omega t$ شکل موج خروجی را رسم کنید (دیود D_2 را ایده آل فرض نمائید) .



شکل ۱۴-۲ : مدار مثال ۱-۲ .

حل : ابتدا نقاط شکست مشخصه را بدست می آوریم :

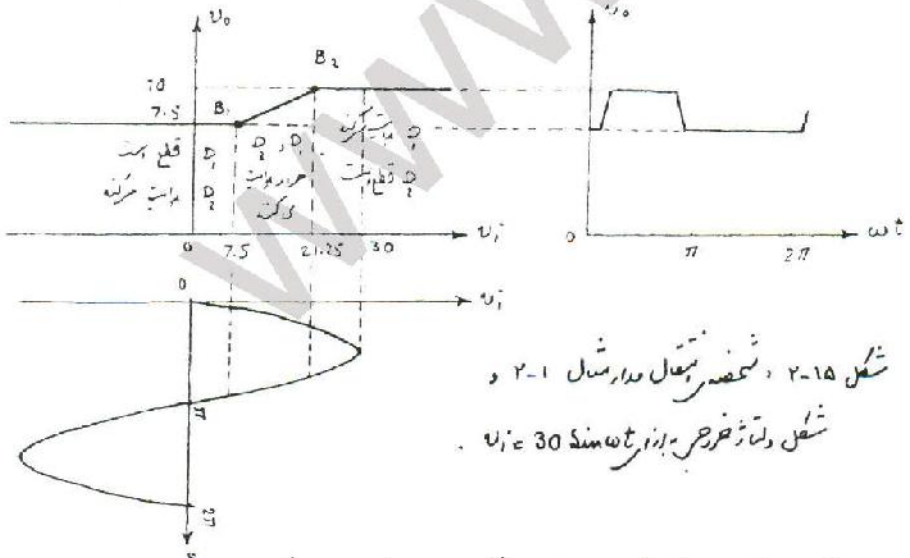
فرض میکنیم در دیود D_1 قطع بوده و دیود D_2 هدایت میکند در اینصورت جریان $i_1 = 0$ بوده و جریان i_2 بصورت زیر بدست میآید :

$$i_2 = \frac{10 - 2.5}{10 + 5} = 0.5 \ mA$$

در اینصورت ولتاژ خروجی برابر خواهد بود با :

$$v_o = 10 - 5 i_2 = 10 - 2.5 = 7.5 \ V$$

در اینحالت چون دیود D_2 در حالت هدایت است لذا ولتاژ نقطهٔ P نیز 7.5^V بوده و ملاحظه میشود که با ازای $v_i < 7.5^V$ دیود D_1 هدایت نخواهد کرد . بنابراین اولین نقطهٔ شکست مشخصه انتقال در $v_i = v_o = 7.5^V$ خواهد بود (نقطهٔ B_1 در شکل ۱۵-۲) .



شکل ۱۵-۲ : مشخصه انتقال مدار مثال ۱-۲ و شکل ولتاژ خروجی با ازای $v_i = 30 \sin \omega t$.

حال فرض میکنیم در دیود D_2 قطع باشد ، در اینحالت $i_2 = 0$ و $v_o = 10^V$ خواهد بود . تحت این شرایط دیود D_1 باید در حالت هدایت باشد . در اینحالت جریان i_1 بصورت زیر بدست میآید :

$$i_1 = \frac{v_i - 2.5}{15+10} = 0.04 v_i - 0.1$$

$$v_P = 2.5 + 10 i_1 = 1.5 + 0.4 v_i$$

برای اینکه دیود D_2 در حالت قطع باشد، v_P باید حداقل 10^V شود. بنابراین:

$$1.5 + 0.4 v_i \geq 10 \quad \text{یا} \quad v_i \geq 21.25$$

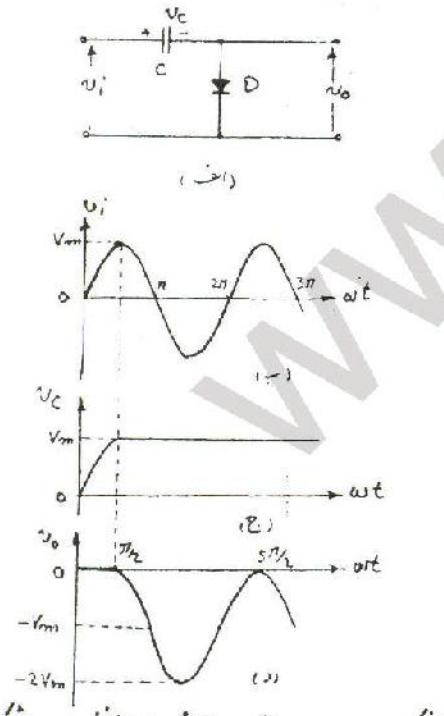
بنابراین نقطه شکست مشخصه انتقال (B_2 در شکل ۱۵-۲) در $v_i = 21.25^V$ واقع شده و در این نقطه $v_o = 10^V$ است.

حال بین این دو نقطه، هر دو دیود در حالت هدایت هستند و در این ناحیه مقاومت خروجی ثابت خواهد بود. چنین مدارهایی خطی نامیده می‌شوند. بنابراین مشخصه انتقال، یک خط مستقیم بین نقاط B_1 و B_2 خواهد بود. این مشخصه انتقال را می‌توان در شکل ۱۵-۲ رسم نمود. با داشتن این مشخصه می‌توان شکل موج خروجی را با داشتن ولتاژ ورودی $v_i = 30 \sin \omega t$ به دست آورد.

۲-۴ : مدارهای جهش[1]

یکی دیگر از کاربردهای دیود، استفاده از آن در مدارهای جهش است. مدار جهش ساده، شامل یک دیود و یک خازن، در شکل ۱۶-۲ الف نشان داده شده است. برای بررسی طرز کار مدار، ولتاژ ورودی آن را به صورت سینوسی در نظر می‌گیریم. هنگامی که ولتاژ ورودی مثبت می‌شود، دیود D در جهت مستقیم بایاس شده و هدایت می‌کند. در این حالت ولتاژ خروجی صفر بوده و جریان دیود، خازن C را شارژ می‌کند (فرض می‌شود که ولتاژ اولیه خازن صفر باشد). در این حالت ولتاژ دو سر خازن، ولتاژ ورودی را دنبال کرده تا مقدار آن به مقدار ماکزیمم ورودی برسد. در این لحظه ولتاژ دو سر خازن V_m می‌شود. هنگامی که مقدار ورودی از V_m کمتر می‌شود، در این صورت ولتاژ دو سر خازن از ورودی بیشتر شده و در نتیجه دیود در جهت معکوس بایاس خواهد شد. چون جهت بایاس معکوس، دیود D یک مدار باز است نگه داشته و ولتاژ دو سر خازن در همان مقدار V_m باقی خواهد ماند. در این حالت ولتاژ خروجی را می‌توان از مجموع ولتاژ ورودی و ولتاژ دو سر خازن C به دست آورد. با نوشتن KVL در مدار خواهیم داشت:

$$v_o = v_i - v_c = v_i - V_m$$



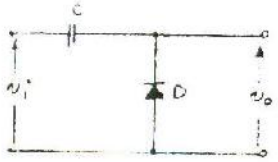
شکل ۱۶-۲ : الف) مدار جهش دهنده منفی؛ ب) شکل موج ورودی پ) شکل موج دو سر خازن ت) شکل موج خروجی

(1) clamping circuit

www.ttnar.ir

طوری در نظر گرفته شده ، دوام این مدار ولتاژ ورودی به اندازه V_m به طرف مقادیر منفی جهش کرده است (شکل ۲-۱۶) .

اگر در مدار شکل الف ۲-۱۶ جهت دیود D عوض شود ، در این صورت که مدار جهش مثبت بدست میآید (شکل ۲-۱۷) . یعنی در این مدار ولتاژ ورودی در خروجی به اندازه مقدار ثابتی از آن در جهت مثبت ولتاژ ، جهش پیدا خواهد کرد . بررسی عملکرد این مدار به عهده دانشجویان واگذار میشود .

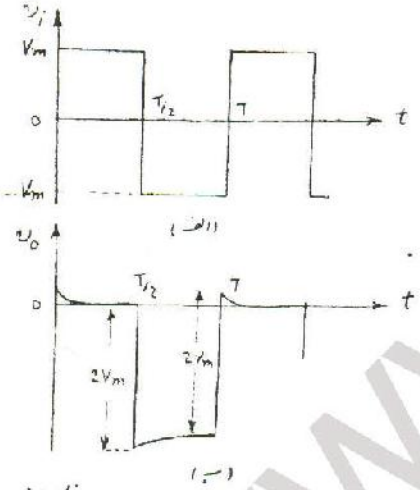


شکل ۲-۱۷ : مدار جهش دهنده مثبت .

اثر دیود آل بودن دیود در مدارهای جهش

در بررسی مدارهای جهش ، نظر به کاربرد زیاد ، دیود را به صورت آل در نظر گرفته شد . چون در دیود ایده آل ، مقاومت در جهت هادی صفر و مقاومت در جهت قطع آن بینهایت در نظر گرفته میشود . لذا در حالت هادی دیود ، ثابت زمانی مدار صفر و در حالت قطع ثابت زمانی بینهایت میباشد . به علت محدود بودن مقاومت قطع دیود و غیر صفر بودن مقاومت هادی آن ، در عمل ثابت زمانی محدود برای شارژ و غیر صفر برای شارژ خازن خواهیم داشت . ثابت زمانی شارژ خازن را با $\tau_2 = R_2 C$ در نظر گرفتیم در حالی که R_2 مقدار کمی است در حدود مقاومت هادی دیود . در حالت قطع دیود به علت وجود مقاومت معکوس محدود (R_1) دیود ، ولتاژ دو سر خازن ثابت نمانده بلکه با ثابت زمانی $\tau_1 = R_1 C$ شروع به تغییر میکند . در شکل ۲-۱۸ شکل ولتاژ خروجی مدار شکل الف ۲-۱۶ به ازای ورودی مربعی نشان داده شده است . لحظه ای که مدار شروع به کار میکند دیود D هادی است و خازن C با ثابت زمانی محدود $\tau_2 = R_2 C$ مقدار کمی شارژ شده و بدست آمده است . در شکل مربع خروجی (شکل ب ۲-۱۸) واضح است که برای جلوگیری از چنین اعوجاجی مقدار خازن C باید مقدار زیادی در نظر گرفته شود . معمولاً مقدار خازن C باید در مقایسه با پریود سیگنال ورودی انتخاب گردد که زمان ثابت باید محدود باشد .

$$\tau_2 = R_2 C \gg \frac{T}{2}$$



شکل ۲-۱۸ : الف) شکل ولتاژ ورودی مدار شکل الف ۲-۱۶ ؛
ب) شکل ولتاژ خروجی مدار شکل الف ۲-۱۶ -
از ثابت زمانی شارژ محدود .

۲-۵ : یکسو کننده های[2] دیودی

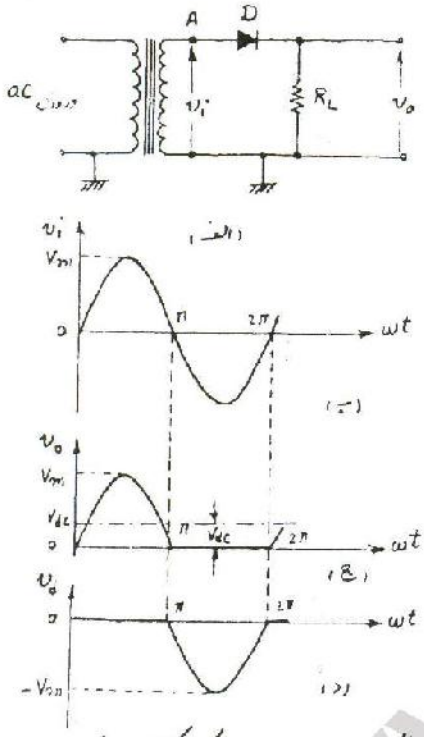
امروزه تمام وسایل الکترونیکی احتیاج به یک منبع تغذیه dc دارند . برای سیستم های الکترونیکی قابل حمل[3] توان کم[4] از باتری استفاده میشود . ولی برای تغذیه بیشتر وسایل الکترونیکی ، منبع تغذیه لازم میشود . منبع تغذیه وسیله ایست که ولتاژ متناوب (ac) برق شهر را به ولتاژ مستقیم (dc) تبدیل میکند . در اینجا قبل از بررسی این مدارها ac به dc میپردازیم .

---

(1) distortion
(2) rectifier
(3) portable
(4) low-power

۲-۶ . یکسوکننده‌ی نیم موج[1]

یک دیود ، نظیر دیود نیمه‌هادی ، می‌تواند یک شکل موج ورودی (که مقدار متوسط آن صفر است) را به یک شکل موج یکطرفه[2] با مقدار متوسط غیر صفر تبدیل کند ، یکسوکننده نامیده می‌شود . یک مدار یکسوکننده نیم‌موج در شکل ۲-۱۹ نشان داده شده است . چون در این مدار یکسوکننده ولتاژ ورودی آن یک ولتاژ سینوسی $v_i = V_m \sin \omega t$ است که دامنه‌ی متغیر آن در مقابل ، ولتاژ آستانه‌ی دیود (V_γ) اغلب زیاد است . لذا در بررسی چنین مدارهایی می‌توان از مقدار این ولتاژ صرف نظر نمود ($V_\gamma = 0$) . اگر مقاومت بار R_L در مقابل ، با مقاومت دیود در حالت هدایت مقدار زیادی باشد می‌توان از مقدار افت ولتاژ مستقیم دیود نیز صرف نظر کرده و دیود را به صورت اتصال کوتاه ایده‌آل در نظر گرفت . در این بررسی مدارهای یکسوکننده ، دیود را به صورت ایده‌آل فرض می‌شود . لازم است در صورت برقرار نبودن هر شرایط ذکر شده باید از تقریب مناسب برای دیود استفاده نمود .



شکل ۲-۱۹ : الف) یکسوکننده‌ی نیم - موج
ب) شکل ولتاژ ورودی ؛ ج) شکل ولتاژ خروجی (دو سر بار) ؛ د) شکل ولتاژ دو سر دیود .

در مدار یکسوکننده‌ی نیم موج نشان داده شده در شکل الف ۲-۱۹ ، هنگامی که پتانسیل نقطه A مثبت شود (نیم سیکل مثبت v_i) ، دیود D بایاس گردیده و در بار R_L جریان برقرار می‌شود . به علت اینکه دیود ایده‌آل فرض شده ، بنابراین می‌توان گفت که در این حالت ، ولتاژ ورودی در خروجی ظاهر خواهد شد . در نیم سیکل منفی v_i پتانسیل نقطه A منفی می‌شود ، دیود D قطع شده و بنابراین جریان بار به صفر می‌رسد . در این حالت ولتاژ خروجی در اتصال ولتاژ دو سر بار است صفر شده و در نتیجه با بکارگیری قانون KVL ملاحظه می‌شود که ولتاژ ورودی عیناً در دو سر دیود ظاهر خواهد شد . در شکل ۲-۱۹ شکل ولتاژ دو سر دیود نشان داده شده است . همان طور که مشاهده می‌شود هنگامی که دیود در بایاس معکوس است (در فاصله $\pi \le \omega t \le 2\pi$) ولتاژ ورودی در دو سر دیود قرار می‌گیرد . در این حالت مقدار حداکثر ولتاژ معکوسی که در دو سر دیود قرار می‌گیرد همان V_m است . به این دلیل که در چنین مدارهایی دیود باید دارای PIV بیشتر از V_m باشد .

مقدار متوسط (dc) ولتاژ یکسو شده‌ی نیم - موج

با توجه به شکل ۲-۱۹ ، ملاحظه می‌شود که ولتاژ ورودی سینوسی دارای مقدار متوسط صفر است . در صورتی که ولتاژ خروجی یکسوکننده یا ولتاژ دو سر بار یک ولتاژ یکسو شده است که مقدار متوسط آن غیر صفر می‌باشد . برای به دست آوردن مقدار متوسط این ولتاژ ، متغیر مستقل در معنی ما

---

(1) half - wave rectifier (2) unidirectional

www.tnar.ir

در یک دوره تناوب بدست آورد . باید عبارت دیگری میتوان نوشت :

$$V_{dc} = V_{av} = \frac{1}{T}\int_0^T v_o\, dt \qquad (۲-۲)$$

با توجه به شکل ج ۱۹-۲ میتوان توصیف ریاضی ولتاژ خروجی را در یک پریود بصورت زیر نوشت :

$$v_o = V_m \sin \omega t \qquad 0 \le \omega t \le \pi$$
$$v_o = 0 \qquad \pi \le \omega t \le 2\pi \qquad (۲-۳)$$

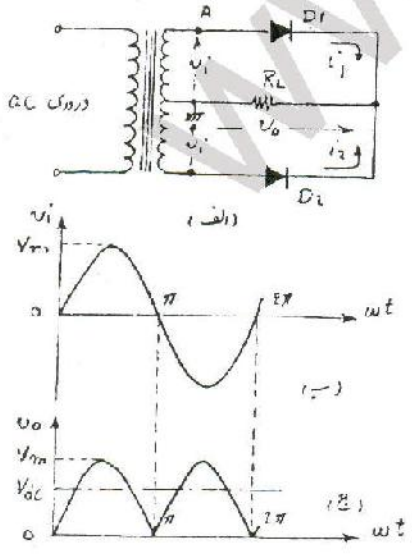
با جایگزین کردن رابطه (۲-۳) در رابطه (۲-۲) مقدار متوسط ولتاژ خروجی بصورت زیر بدست میآید :

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} = 0.318\, V_m \qquad (۲-۴)$$

باید دقت کرد که در مدار، متوسط جریان گذرنده از دیود، از رابطه $\frac{V_{dc}}{R_L}$ و مقادیر جریان گذرنده از آن از رابطه $\frac{V_m}{R_L}$ بدست می‌آید. هنگام انتخاب دیود برای یک یکسوکننده نیم موج باید جریان متوسط و جریان ماکزیمم از مقادیر فوق بیشتر در نظر گرفته شود .

۲-۷ : یکسوکننده ی تمام موج (با ترانس سر وسط دار) [1]

طوری که خط شد در یکسوکننده نیم موج مقدار متوسط ولتاژ خروجی (ولتاژ دوسر بار) حداکثر برابر $0.318\,V_m$ (با در نظر گرفتن افت ولتاژ دیود آل) بود . دلیل کم بودن این مقدار متوسط بعلت عدم استفاده از نیم پریود منفی سیگنال ورودی است . با استفاده از دو دیود میتوان مداری بدست آورد که خروجی آن در هر دو نیم سیکل مثبت و منفی ورودی، دارای ولتاژ مثبت در خروجی باشد . چنین مداری در شکل ۲۰-۲ همراه با شکل ولتاژ ورودی و خروجی نشان داده شده است . در تحلیل ابتدا فرض بر این خواهد شد ، مقدار متوسط ولتاژ خروجی در این مدار دو برابر خروجی مدار یکسوکننده نیم موج است .



شکل ۲۰-۲ : الف) مدار یکسوکننده تمام موج با ترانس سر وسط دار ؛
ب) شکل ولتاژ ورودی ؛ ج) شکل ولتاژ خروجی

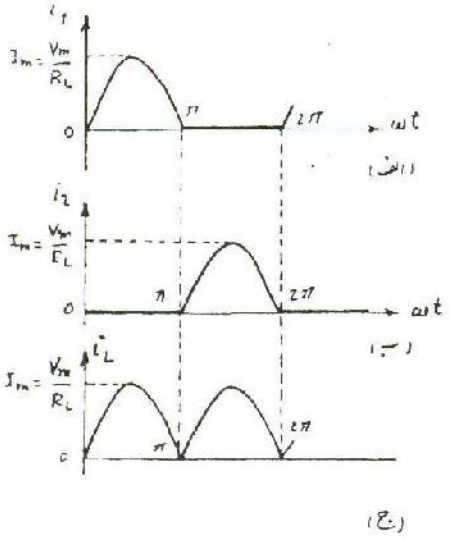
مثال : بررسی طرز کار این مدار را شروع میکنیم . همانطوری که در شکل الف ۲۰-۲ نشان داده شده ، این مدار یکسوکننده از یک ترانسفورماتور سر وسط دار

(1) Full Wave rectifier (center taped)

www.tnar.ir

و دو دیود تشکیل داده است . با توجه به اینکه تعداد سیم پیچ ثانویه ترانس، تکیان در نظر گرفته می‌شود ، ولتاژ القا شده دو نقاط A و B از نظر فاز به تکیان اندازه و 180° با هم اختلاف فاز خواهند داشت . بنابراین هنگامی که در دیود D_1 ولتاژ ترانس دارای نیم سیکل مثبت باشد ، نسبت به نقطه A مثبت بوده و نسبت به نقطه B منفی خواهد شد . این عمل باعث می‌شود که دیود D_1 هدایت کرده و جریان i_1 در مدار برقرار شود . در این لحظه دیود D_2 قطع بوده و در نتیجه جریان گذرنده از مدار آن (i_2) صفر است . در نیم سیکل منفی دیود ac ، با تکیه نسبت به نقطه A منفی شده و نسبت به نقطه B مثبت می‌گردد . این تغییر حالت باعث جابجایی نقش دیودهای D_1 و D_2 در هدایت جریان می‌شود . به عبارت دیگر در این حالت دیود D_1 قطع شده ($i_1 = 0$) و دیود D_2 به حالت هدایت می‌رسد ($i_2 \neq 0$) . با توجه به اینکه جهت جریان برقرار شده در مقاومت بار R_L در هر دو حالت یکسان است ، بنابراین ولتاژ دو سر بار همواره مثبت بوده و در نتیجه ولتاژ خروجی ولتاژ یکسو شده‌ی تمام موج خواهد داشت .

شکل جریان i_1 و i_2 و جریان بار برای یکسو کننده‌ی تمام موج شکل الف ۲۰-۲ به شکل ۲۱-۲ نشان داده شده است .



شکل ۲۱-۲ : شکل جریان یکسو کننده‌ی تمام موج ؛ الف) جریان دیود D_1 ؛ ب) جریان دیود D_2 ؛ ج) جریان بار .

وقتی در ورودی دارای حداکثر مقدار V_m است (نیم سیکل مثبت) دیود D_1 هادی شده و دیود D_2 قطع می‌باشد . در این حالت مقدار ولتاژ مقاومتی در دو سر دیود D_2 قرار می‌گیرد ، برابر $2V_m$ است . این مسأله را می‌توان به راحتی از نوشتن رابطه‌ی KVL در حلقه‌ی شامل دیود D_2 و مقاومت بار R_L است ، نتیجه گرفت . همینطور مقدار ولتاژ مثبت در دو سر حداکثر منفی ورودی ، مقدار ولتاژ معکوس دو سر دیود D_1 برابر $2V_m$ خواهد بود . در انتخاب دیود مورد نظر در مدارهای یکسو کننده ، دیودهای D_1 و D_2 هنگام قطع باید ولتاژ معکوس $2V_m$ را تحمل نمایند . بنابراین هنگام طرح این مدار باید دیود D_2 را استفاده نمود که دارای PIV بیشتر از $2V_m$ باشد .

مقدار متوسط (dc) ولتاژ یکسو شده‌ی تمام موج

با استفاده از رابطه‌ی (۲-۲) می‌توان مقدار متوسط ولتاژ خروجی مدار شکل الف ۲۰-۲ را بدست آورد . در اینجا می‌توان ولتاژ دو سر بار را بصورت زیر نوشت :

$$v_o = V_m \sin \omega t \qquad 0 \leq \omega t \leq \pi \qquad (۲-۵)$$

با استفاده از رابطه‌ی فوق و همچنین رابطه‌ی (۲-۲) ، مقدار متوسط ولتاژ خروجی یکسو کننده‌ی تمام موج بصورت زیر بدست می‌آید :

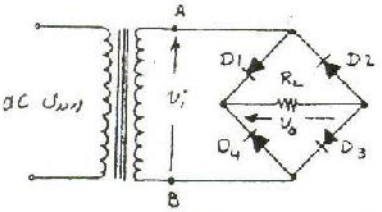
www.tmar.ir

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} = 0.636\, V_m \qquad (۲-۶)$$

نظیر در نظر گرفته شده، ولتاژ متوسط خروجی برای یکسوکننده دو برابر مقدار آن در یکسوکننده نیم موج است. بنابراین می‌توان گفت که قدرت این مدار نسبت به مدار قبلی دو برابر و ولتاژ خروجی متوسط بیشتری است. ولی باید دقت نمود در این مدار احتیاج به دو دیود داشته و ترانسفورماتور آن نیز باید بصورت ترانس سر وسط دار باشد و علاوه بر این، دیودهای این مدار دارای PIV دو برابر دیود مدار یکسوکننده نیم موج است.

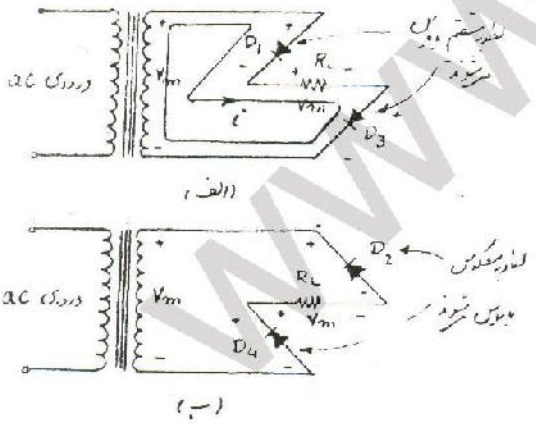
۲-۸ : مدار یکسوکننده‌ی پل [1]

در شکل ۲-۲۲ یک مدار یکسوکننده نشان داده شده است. نظیر در نظر گرفته شده، این مدار از چهار دیود و یک ترانسفورماتور تشکیل شده است. ترانسفورماتور این مدار یک ترانسفورماتور ساده است. این مدار نیز یک یکسوکننده تمام موج است، یعنی ولتاژ خروجی آن نظیر مدار قبلی یک ولتاژ یکسو شده تمام موج می‌باشد. برای بررسی عملکرد این مدار، سیر هدایت و قطع مدار را در دو نیم سیکل مثبت و منفی ورودی در نظر می‌گیریم.



شکل ۲-۲۲ : مدار یکسوکننده‌ی پل.

هرگاه ولتاژ ورودی در نیم سیکل مثبت باشد، به این صورت که پتانسیل نقطه A نسبت به B مثبت شود، دیودهای D_1 و D_3 هدایت می‌کنند. در این حالت جهت جریان مدار از طریق دیودهای D_1 و D_3 و مقاومت ترانس برقرار می‌شود. این حالت در شکل الف ۲-۲۳ نشان داده شده است. همانطور که گفته شد، در این حالت دیودهای D_2 و D_4 قطع شده و اگر حلقه شامل این دیودها را در نظر بگیریم (شکل ب ۲-۲۳) مشاهده می‌شود که مجموع ولتاژ متقابل دو سر دیودهای D_2 و D_4 برابر $2V_m$ است. با توجه به یکسان بودن این دیودها می‌توان گفت در ولتاژ متقابل دو سر هر کدام از آنها برابر V_m خواهد بود. بنابراین ملاحظه می‌شود که در این نوع یکسوکننده، PIV هر کدام از دیودها نصف یکسوکننده‌ی تمام موج با ترانس سر وسط دار است.



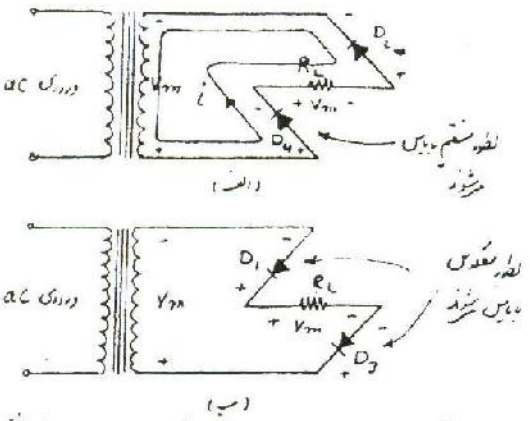
شکل ۲-۲۳ : مدار معادل یکسوکننده‌ی پل به ازای نیم سیکل مثبت ورودی : الف) مسیر هدایت دیودها ؛ ب) مسیر قطع دیودها.

اگر ولتاژ ورودی دارای نیم سیکل منفی گفته (نیم سیکل منفی) در این صورت حالت دیودهای مدار عکس می‌شود، یعنی دیودهای D_2 و D_4 هادی کرده و

(1) Bridge rectifier

www.itrar.ir

با فکر بلوه‌ای D_1 و D_3 قطع خواهند شد. شکل الف ۲-۲۴ مسیر هدایت دیودهای D_2 و D_4 را در این حالت نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های الف ۲-۲۴ و الف ۲-۲۴ مشاهده می‌شود که در هر دو حالت قطبیت عبور از مقاومت بار یکسان است. بنابراین ولتاژ دو سر مقاومت R_L در هر دو نیم سیکل در یک جهت بوده و شکل موج خروجی یک ولتاژ یکسو شده تمام موج خواهد بود. دقیقاً به طریقه با شکل ب ۲-۲۴ حداکثر ولتاژ معکوس دو سر دیودهای D_1 و D_3 برابر V_m است می‌باشد.



شکل ۲-۲۴ : مدار معادل یکسو کننده تمام موج برای نیم سیکل ورودی : الف) مسیر هدایت دیودها ؛ ب) مسیر قطع دیودها .

با مقایسه یکسو کننده‌ی تمام موج با ترانس سر وسط دار و تمام موج پل، مشاهده می‌شود که مزیت مدار اخیر - مدار قبلی دارا نیست که این مدار احتیاج به ترانس سر وسط دار ندارد و همچنین دیودهای آن دارای PIV نصف دیودهای یکسو کننده تمام موج با ترانس سر وسط دار هستند. بنابراین برای یکسو کردن ولتاژهای با دامنه زیاد معمولاً با یکسو کننده پل استفاده می‌کنند.

۲-۹ : مطالب کلی راجع به فیلترها [1]

با توجه به مطالب گفته شده در مورد یکسو کننده‌ی نیم موج و تمام موج مدار خط مشخصه خروجی این مدارها، یک موج یکسو شده با مقدار متوسط غیر صفر است. ولی مشاهده می‌شود که خروجی این مدارها کاملاً به صورت ولتاژ مستقیم نیست. یعنی علاوه بر مولفه dc دارای مولفه متناوب (ac) نیز می‌باشد. وجود قسمت متناوب همراه با قسمت dc در شکل موج خروجی یکسو کننده، برای برخی از کاربردها نظیر مدار شارژ کننده باتری [2] مشکل قابل حل نیست. ولی استفاده از چنین منابعی برای سیستم‌های الکترونیکی نظیر رادیو و یا ضبط صوت خالی از اشکال نیست. برای چنین سیستم‌هایی ولتاژ منبع تغذیه باید کاملاً به صورت dc بوده و حتی المقدور مقدار متناوب آن به صفر برسد. برای صاف کردن شکل موج ولتاژ خروجی مدارهای یکسو کننده از فیلتر استفاده می‌شود که تعدادی از انواع مختلف آن در این قسمت بررسی خواهد شد. قبل از بررسی فیلترهای مختلف به معرفی چند پارامتر می‌پردازیم که در مورد فیلترها بکار می‌روند تا بتوانیم به کیفیت فیلتر در صاف کردن خروجی یک مدار یکسو کننده پی ببریم.

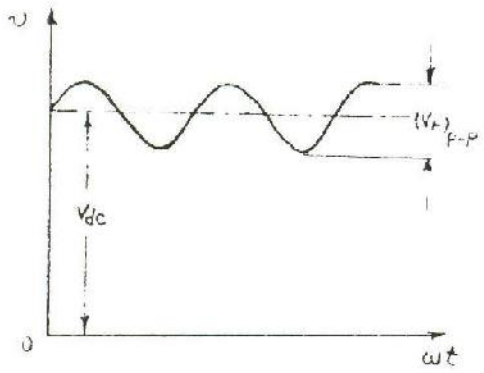
ضریب ریپل [3]

هر نظیری که گرفته شد منظور از کار فیلتر، صاف کردن ولتاژ خروجی یک مدار یکسو کننده است. ولی حالت کلی می‌توان خروجی یک فیلتر را نظیر شکل ۲-۲۵ در نظر گرفت که دارای هر دو مولفه ac و dc می‌باشد. چون مقدار ولتاژ خروجی را اصطلاحاً ریپل [4] می‌نامند.

---

(1) Filters
(2) battery charger
(3) ripple factor
(4) ripple

واضح است هرچه دامنه ی ولتاژ پایه لیست به مقدار dc خروجی کمتر باشد، عملکرد فیلتر از نظر صاف کردن ولتاژ بهتر خواهد بود. مقدار موثر ولتاژ پایه لیست مرکب از یک ولتاژ ac که مقدار موثر آن را می سنجید، اندازه گرفت. همچنین مقدار متوسط یا dc ولتاژ خروجی فیلتر نیز قابل اندازه گیری توسط ولتمتر dc است. اگر مقدار موثر جزء متناوب خروجی، $V_r(rms)$ و مقدار متوسط آن، V_{dc} نشان داده شود، مرکب پایه را به صورت زیر تعریف نمود:



شکل ۲-۲۵: شکل ولتاژ خروجی یک فیلتر خازنی کامل.

$$\text{ضریب پایه} = \frac{V_{r(rms)}}{V_{dc}} \qquad (۲-۷)$$

معمولاً این ضریب را به صورت درصد نشان می دهند؛ بنابراین

$$\%\ \text{ضریب پایه} = \frac{V_{r(rms)}}{V_{dc}} \times 100 \qquad (۲-۸)$$

با توجه به دو رابطه فوق مرکب ضریب پایه را به عنوان یک معیار دیگر مهم در بررسی عملکرد فیلتر داریم. واضح است هرچه ضریب فوق برای فیلتر کم باشد، عملکرد آن از نظر صاف کردن خروجی بهتر خواهد شد.

ضریب تنظیم ولتاژ

پارامتر دیگری که در بررسی کیفیت منابع ولتاژ کاربرد دارد میزان تغییرات ولتاژ خروجی آن بر اساس تغییر جریان بار است. در حالت منبع ولتاژ ایده آل، ولتاژ دو سر منبع به جریان کشیده شده از آن بستگی نداشته و مقدار ثابتی است. برای منابع ولتاژی که در بسیاری از مدارهای الکترونیکی و فیلتر ساخته می شوند، ولتاژ خروجی تابع جریان بار بوده و با ازای تغییر بار مقدار این ولتاژ نیز تغییر خواهد نمود. برای بررسی کیفیت منابع تغذیه و یا مقایسه تغییرات بار از پارامتری بنام ضریب تنظیم ولتاژ[1] استفاده می گردد که به صورت زیر تعریف می شود:

$$V.R. = \frac{\text{ولتاژ دو سر بار در حالت بدون بار} - \text{ولتاژ دو سر بار در حالت بار کامل}}{\text{ولتاژ دو سر بار در حالت بار کامل}}$$

$$V.R. = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \qquad (۲-۹)$$

این ضریب نیز معمولاً به صورت درصد بیان می شود:

$$\%\ V.R = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100 \qquad (۲-۱۰)$$

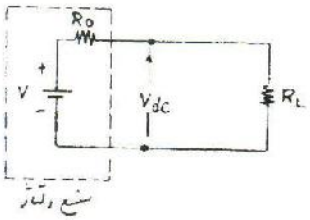
واضح است در یک منبع ولتاژ ایده آل مقدار این ضریب صفر است، هرچه مقدار آن برای منبعی کمتر باشد، آن منبع به منبع ولتاژ ایده آل نزدیکتر خواهد بود.

---

(1) Voltage regulation

www.tmar.ir

مثال ۲-۲ : مدار معادل تونن منبع ولتاژ بصورت شکل ۲-۲۶ داده شده است . وقتی تنظم ولتاژ این منبع با توجه مقاومت بار و مقاومت داخلی منبع بدست آورید .



شکل ۲-۲۶ : مدار مثال ۲-۲ .

حل : برای بدست آوردن V_{NL} کافیست در مقاومت R_L از مدار جدا شده ، در اینحالت جریان مدار صفر میشود ، بنابراین خواهیم داشت :

$$V_{NL} = V$$

وقتی در مقاومت بار R_L در مدار قرار گیرد میزان ولتاژ دوسر آن بدست آورد . در اینحالت داریم :

$$V_{FL} = \frac{V \times R_L}{R_o + R_L}$$

با استفاده از رابطه (۲-۹) خواهیم داشت :

$$V.R. = \frac{V - \frac{V.R_L}{R_o+R_L}}{\frac{VR_L}{R_o+R_L}} = \frac{V.R_o}{VR_L} = \frac{R_o}{R_L}$$

از اینجا ملاحظه میشود هرچه مقاومت داخلی منبع ولتاژ در مقابل مقاومت بار کوچکتر باشد ، یعنی تنظم منبع کمتر بوده و منبع ولتاژ بحالت ایدال نزدیکتر خواهد شد . در حالت منبع ولتاژ ایدال مقاومت داخلی برابر صفر بوده و نتیجتاً $V.R.$ نیز صفر میشود .

۲-۱۰ : ضریب رابیل موج یکسو شده

همانطور که گفته شد ، خروجی مدارهای یکسو کننده نیم موج و تمام موج علاوه بر مولفه dc دارای جزء متناوب نیز هستند . برای بررسی یکی هرک از این مدارها میزان ضریب رابیل مربوط به هرک را بدست آورد . بر اساس نشان میدهد که خروجی یکسو کننده تمام موج دارای ضریب رابیل کمتری از یکسو کننده نیم موج است . زیرا - بر اساس ضریب رابیل هرک از ولتاژهای یکسو شده نیم موج و تمام موج مشخص میشود .

اگر ولتاژ خروجی یکسو کننده نیم موج و یا تمام موج را در حالت کلی بصورت زیر نشان دهیم ، در اینصورت برای بدست آوردن مقدار موثر جزء متناوب آن میتوان نوشت :

$$v_{ac} = v - V_{dc} \qquad (۲-۱۱)$$

در رابطه v_{ac} و V_{dc} ترتیب نشان دهنده جزء متناوب و مقدار متوسط ولتاژ زیر هستند . اگر مقدار موثر v_{ac} را $V_{r(rms)}$ نشان دهیم از تعریف ضریب رابیل داریم :

www.tnar.ir

$$V_{r(rms)} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T v_{ac}^2 \cdot dt \right]^{1/2} \qquad (۲-۱۲)$$

با استفاده از رابطه (۲-۱۱) در رابطه (۲-۱۲) رابطه زیر بدست می‌آید :

$$V_{r(rms)} = \left[V_{(rms)}^2 - V_{dc}^2 \right]^{1/2} \qquad (۲-۱۳)$$

در آن $V_{(rms)}$ مقدار مؤثر کل ولتاژ v است که بصورت زیر تعریف می‌شود :

$$V_{(rms)} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T v^2 \cdot dt \right]^{1/2} \qquad (۲-۱۴)$$

ضریب رایپل موج تمام‌موج تمام‌شده‌ی نیم موج

با استفاده از رابطه (۲-۳) و (۲-۱۴) می‌توان مقدار $V_{(rms)}$ را برای موج تمام‌شده نیم موج بدست آورد. در این صورت خواهیم داشت :

$$V_{(rms)} = \frac{V_m}{2} \qquad (۲-۱۵)$$

با قرار دادن روابط (۲-۴) و (۲-۱۵) در رابطه (۲-۱۳) داریم :

$$V_{r(rms)} = \left(\frac{V_m^2}{4} - \frac{V_m^2}{\pi^2} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.385 V_m \qquad (۲-۱۶)$$

نیم موج :

با استفاده از رابطه (۲-۷) می‌توان ضریب رایپل را برای موج تمام‌شده نیم موج بدست آورد :

$$r = \frac{0.385 V_m}{0.318 V_m} = 1.21 \doteq 121\% \qquad (۲-۱۷)$$

نیم موج :

ضریب رایپل موج تمام‌شده‌ی تمام موج

با استفاده از روابط (۲-۵) و (۲-۱۴) مقدار $V_{(rms)}$ برای موج تمام‌شده تمام موج بصورت زیر بدست می‌آید :

$$V_{(rms)} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \qquad (۲-۱۸)$$

تمام موج :

با قرار دادن روابط (۲-۶) و (۲-۱۸) در رابطه (۲-۱۵) داریم :

$$V_{r(rms)} = \left(\frac{V_m^2}{2} - \frac{4 V_m^2}{\pi^2} \right)^{1/2} = 0.308 V_m \qquad (۲-۱۹)$$

تمام موج :

www.itnar.ir

با قرار دادن روابط (۲-۱۹) و (۲-۶) در رابطه (۲-۷) ضریب رایپل برای موج تمام موج بدست می‌آید :

$$r = \frac{0.308\ V_m}{0.636\ V_m} = 0.48 \quad \text{یا} \quad 48\% \qquad (۲-۲۰)$$

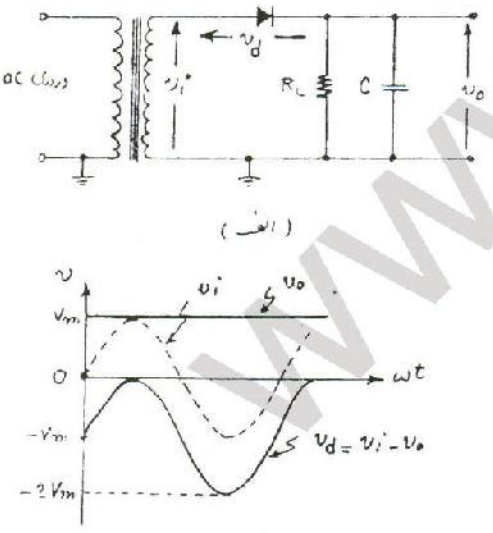
تمام موج :

همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار ضریب رایپل موج تمام موج تقریباً 2.5 برابر کوچکتر از ضریب رایپل نیم موج است. باید دقت کرد که ضریب رایپل بدست آمده لزوماً مقدار دامنه ماکزیمم ولتاژ (V_m) ندارد. اگر این مقدار زیاد شود، مقدار V_{DC} و V_{rms} نیز هر دو بطور همزمان زیاد شده، لذا ضریب رایپل ثابت باقی می‌ماند.

۲-۱۱ : فیلتر خازنی[1]

برای صاف کردن خروجی یکسو کننده معمولاً از یک خازن بصورت موازی مقاومت بار قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود. عملکرد این سیستم از این واقعیت ناشی می‌شود که خازن در پریود هدایت دیود، انرژی را ذخیره کرده و در حالت معکوس آن، آنرا به مقاومت بار پس می‌دهد. بنابراین عمل دشارژ خازن دوباره برقرار می‌شود، زمانیکه دامنه ولتاژ ورودی رایپل از مقدار ماکزیمم کاهش می‌یابد.

مدار یکسو کننده نیم موج با فیلتر خازنی را در شکل الف ۲-۲۷ نشان داده شده است. در نظر می‌گیریم. ابتدا فرض می‌شود که مقدار مقاومت بار (R_L) بینهایت باشد (حالت بی باری). در نیمه سیکل مثبت دیود D هدایت می‌کند، خازن C به مقدار ولتاژ ماکزیمم V_m شارژ می‌شود. در نیم سیکل منفی دیود در حالت قطع است، چون مقاومت معکوس خیلی زیاد (در حالت ایده‌آل، بینهایت) مدار C شارژ خود را در همان مقدار V_m نگه می‌دارد. بنابراین شکل موج خروجی کاملاً صاف شده و مقدار آن (V_o) ثابت باقی می‌ماند.



شکل ۲-۲۷ : الف) مدار یکسو کننده نیم موج همراه فیلتر خازنی ؛ ب) شکل موج ولتاژ خروجی، ورودی و دیود رایپل

شکل ولتاژ خروجی (V_o) همراه با شکل ولتاژ ورودی و ولتاژ دو سر دیود در شکل ب-۲۷-۲ نشان داده شده است.

با نوشتن KVL در مدار یکسو کننده‌ی رایپل می‌توان ولتاژ دو سر دیود را بدست آورد :

$$V_d = V_i - V_o \qquad (۲-۲۱)$$

همانطور که در شکل ب-۲۷-۲ نیز مشاهده می‌شود، ولتاژ دو سر دیود همواره منفی بوده و حداکثر ولتاژ معکوس آن دو برابر دامنه ماکزیمم آن یعنی $2V_m$ است.

---

(1) Capacitor filter

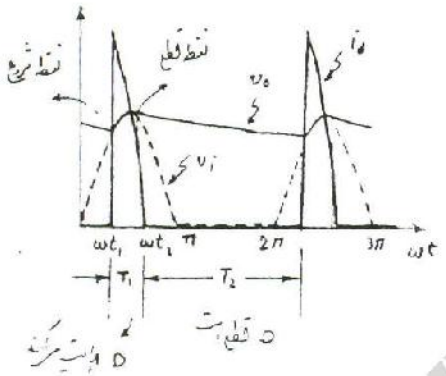
www.tnar.ir

بنابراین وقتی خازن بحد مرتفع درحداکثر ولتاژ متناوب دوسر دیود مبدل نیم موج V_m بوده و بمقدار $2V_m$ افزایش میدا کند.

حال فرض میکنیم درمقدار R_L محدود باشد. دراین وقت خازن شکل جریان و ولتاژ دوسر بار و طول پریود هدایت بصورت عمومی خواهد بود. افزودن خازن به مدار یکسو کننده موجب میشود که در مقداری از پریود منفی ولتاژ ورودی، آن عنصر شاخه شده و بهنگامی دیود قطع میشود، زیرا طریق مقاومت بار در آن رشاخه میشود. در این صورت دیود بمدار نظیر یک کلید عمل میکند. یعنی بهنگامی ولتاژ ورودی از ولتاژ دوسر خازن افزایش یابد، دیود هدایت کرده خازن را شارژ میکند و بمحض اینکه ولتاژ ورودی از ولتاژ دوسر خازن کمتر شود، دیود قطع شده خازن با ثابت زمانی $R_L C$ بطور نمایی قطع خواهد شد.

ولتاژ خروجی با بار

هنگامی که دیود هدایت میکند (شکل الف ۲۷-۲) ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور مستقیماً روی مقاومت بار قرار میگیرد (از افت ولتاژ روی دیود صرف نظر میشود). بنابراین رجیش حالتی، ولتاژ خروجی برابر $v_o = V_m \sin \omega t$ خواهد بود. در فاصله ای که دیود قطع میشود، خازن از طریق بار با ثابت زمانی $R_L C$ شارژ خواهد شد. شکل موج ولتاژ خروجی به این ترتیب در شکل ۲۸-۲ نشان داده شده است. نظر به اینکه در شاخه ای که دیود قرار دارد در فاصله زمانی هدایت دیود ولتاژ خروجی منطبق بر ولتاژ ورودی بوده و در فاصله زمانی قطع آن، نظر به زمانی که جریان مصرف میشود.



شکل ۲۸-۲ : شکل ولتاژ خروجی و جریان دیود در یکسو کننده نیم موج با فیلتر خازنی (الف) و (ب).

نقطه ای را در آن دیود شروع به هدایت میکند، نقطه شروع (۱) t_1 و نقطه ای را در آن قطع میشود، نقطه قطع (۲) t_2 مینامند. این زمانها در شکل ۲۸-۲ مشخص شده اند. لحظه ای که جریان از صفر میگذرد دیود دیگر هدایت نمیکند زمانهای t_1 و t_2 کاملاً مشخص خواهد شد.

نظر به اینکه در طول مدت قطع شدن افزودن خازن C در خروجی مقدار رابل را کم میکند. هرچه مقدار خازن بیشتر باشد، مقدار رابل خروجی کمتر خواهد شد. ولی همانطور که بعداً نشان داده خواهد شد، افزایش مقدار خازن C تا حدی بالا رفتن مقدار حداکثر جریان دیود شده که این نیز بنوبه خود محدودیتی برای افزایش بیش از حد خازن بوجود خواهد آورد.

خروجی مدار یکسو کننده ای تمام موج با فیلتر

یک مدار یکسو کننده تمام موج را در دو سر مدار یک خازن C قرار داده شده، نظیر مدار نشان داده شده در شکل ۲۹-۲ در نظر میگیریم. بررسی عملکرد این مدار، نظیر همان مدار یکسو کننده نیم موج است. در شکل ۳۰-۲ شکل موج ولتاژ خروجی چنین مداری نشان داده شده است. دقت کنید در شکل ولتاژ خروجی مدار یکسو کننده تمام موج بدون فیلتر خازنی نیز با خطوط نقطه چین مشخص شده است. در این مدایر

(۱) cut-in (۲) cut-out

www.itar.ir