فصل چهارم
دیود

٤-١ مقدمه

دیودها را به کمک نیمه رسانا ها و لامپ خلا[1] می توان ساخت.

در اواخر قرن ۱۹ میلادی، به واسطه آغاز ارتباطات بی سیم و هم چنین یکسو سازی برق شهر، نیاز به دیود پیدا شد. این کار به کمک سیستم های الکترو مکانیکی انجام می شد که چندان مناسب نبود (چرا؟). همزمان موادی کشف شدند که خاصیت نیمه هادی داشتند و می توانستند در یکسو سازی مورد استفاده قرار گیرند. در سال ۱۹۰۱ براون[2] یکسو ساز نیمه هادی (دیود مس-اکسید مس) و در سال ۱۹۰٤ فلمینگ[3] اولین دیود لامپی (دیود خلاء) را ابداع می کند. این دیودها که بر اساس پدیده ترمویونیک[4]

[1] Vacuum Tube
[2] Helmut Braun
[3] John Fleming
[4] Thermo-Ionic

ادیسون کار می کند[1]. در حال حاضر هنوز در فرکانس های بالا و توانهای زیاد، از این نوع لامپ ها استفاده می شود. ولی برای اکثر کار های متداول، استفاده از نیمه هادی ها مناسبتر است. پس از کشف خاصیت نیمه رسانایی ژرمانیوم[2] و سیلیسیم[3] دیودهای معمولی را با این مواد می ساختند. از اواخر دهه‌ی شصت قرن بیستم میلادی به این طرف، تقریباً در ساخت اغلب دیودهایی که برای یکسو سازی استفاده می شوند، سیلیسیوم به کار می رود.

٤-٢ نیمه هادی ها

در این بخش می خواهیم اندکی با خواص نیمه هادی ها آشنا شویم[4]. همانطور که قبلاً اشاره شد[5] فلزات، آلیاژ آنها و برخی از مواد دیگر – در شرایط متعارفی[6] – دارای هدایت الکتریکی زیاد، به عبارت دیگر مقاومت الکتریکی کم هستند. در مهندسی برق، موادی که مقاومت مخصوص آنها $\rho < 10^{-2}\,\Omega cm$ باشد، به عنوان رسانا یا هادی[7] شناخته می شوند. غیر فلزات، بعضی از ترکیبات فلزات و برخی مواد دیگر نظیر چوب، شیشه، میکا و انواع پلاستیک ها – در شرایط متعارفی – دارای هدایت الکتریکی کم به عبارت دیگر مقاومت الکتریکی زیاد هستند. در مهندسی برق، موادی که مقاومت مخصوص آنها $\rho > 10^{5}\,\Omega cm$ باشد، به عنوان نارسانا، غیر رسانا یا عایق[8] شناخته می شوند.

---

[1] ر. ک. به پیوست ٤-١

[2] Germanium

[3] سیلیکان، Silicium, Silicon

[4] جهت اطلاعات بیشتر ر. ک. به پیوست ٤-٢ یا کتب مربوطه. در ضمن قسمتهایی از این بخش اقتباس و تلخیصی از [٢] است.

[5] ر. ک. به درس اصول مهندسی برق، فصل ٢-٤

[6] دمای اتاق، فشار جو و میدان های الکتریکی چند ولت بر سانتیمتر

[7] Conductance

[8] Insulator

موادی که مقاومت مخصوص آنها بین دو مقدار مذکور است به نیمه هادی مشهورند. بعضی عناصر جزو این مواد محسوب می شوند. شکل ٤-١ قسمتی از جدول تناوبی (مندلیف) را نشان می دهد که در آن عناصری که دارای خاصیت نیمه هادی هستند، با هاشور مشخص شده اند. عناصری که در صنعت به عنوان نیمه رسانا مورد استفاده قرار میگیرند با یک مربع نشان داده شده اند.

II	III	IV	V	VI
Be	B	C	N	O
Mg	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te
Hg	Tl	Pb	Bi	Po

شکل ٤-١ عناصری که خاصیت نیمه رسانایی دارند

علاوه بر عناصر، ترکیبی از عناصر مانند SiC، $SiGe$ از گروه چهارم، AlP، $AlAs$، GaP، ... و به خصوص $GaAs$ و جدیداً GaN از گروه سوم و پنجم، ZnS، CdS، $CdSe$، ... از گروه دوم و ششم، همچنین ترکیبات بسیار دیگری نظیر: PbS، PbO، CuO، ZnO، Zn_3As_2، Sb_2Te_3، $CdGeAs_2$، $ZnSiP_2$، $AgGaS_2$، ... وجود دارند که خاصیت نیم هادی دارند و بسیاری از آنها در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند. [١]

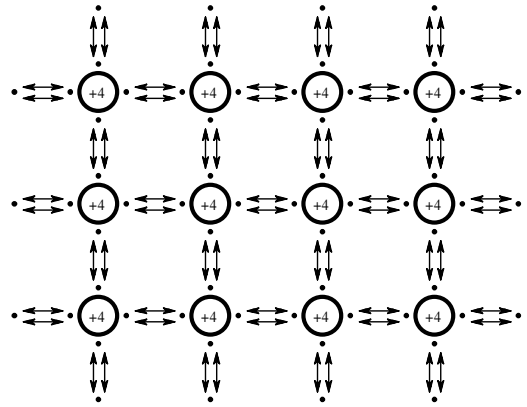
در این درس ما از نیمه هادی ها فقط در مورد سیلیسیوم (Si) بحث می کنیم، مگر این که خلافش ذکر شود.

٤-٢-١ ساختمان کریستالی سیلیسیوم

در شبکه کریستالی سیلیسیوم[1]، هر اتم از سوی چهار اتم دیگر که تشکیل یک هرم را می دهند احاطه شده است. چون نمایش سه بعدی و درک آن مشکل تر است - جهت ساده تر شدن مطلب - در شکل ٤-٢ شبکه کریستالی سیلیسیوم به صورت دو بعدی نمایش داده شده است. همانطور که می دانیم، اتم

[1] این مطالب در مورد ژرمانیوم، الماس و برخی عناصر دیگر نیز صادق است

های عناصر گروه چهارم در مدار آخر خود دارای ٤ الکترون هستند. این اتم ها می خواهند مدار آخر خود را با هشت الکترون کامل کنند. بنابراین هر اتم یک الکترون خود را با یکی از اتم های مجاور به اشتراک می گذارد و به این ترتیب یک ترکیب کووالانسی[1] را تشکیل می دهد. در شکل ٤-٢ این اشتراک توسط فلش های دو طرفه نمایش داده شده است. یعنی این دو الکترون دایماً بین مدارهای این دو اتم در حرکت هستند. این چهار الکترون مدار آخر دارای چهار پروتون متناظر در هسته هستند. به همین دلیل در دایره ای که مبین هسته اتم است، عدد 4+ نوشته شده است.



شکل ٤-٢ نمایش دو بعدی کریستال سیلیسیوم

اگر هیچگونه انرژی خارجی به کریستال اعمال نشود، هیچ الکترونی هم که بتواند آزادانه در بین اتمهای کریستال حرکت کند وجود نداشته، جریان الکتریکی نمی تواند بر قرار شود. بنابراین در دمای صفر مطلق، کریستال سیلیسیوم مانند یک عایق عمل می کند.

انرژی لازم برای شکستن یک پیوند کووالانس برای سیلیسیوم حدود $E \approx 1.1eV$[2] است. بنابراین با افزایش دما – به علت وجود انرژی گرمایی – شبکه کریستالی شروع به ارتعاش می کند. این امر باعث می شود که برخی از پیوندهای کووالانسی شکسته و الکترون های آنها جدا شده به صورت الکترون های آزاد در آیند. طبیعی است که هر قدر دما، به عبارت دیگر انرژی بیشتر باشد، احتمال بوجود آمدن الکترونهای آزاد نیز بیشتر خواهد بود. با شکستن هر پیوند و رها شدن یک الکترون، یک جای خالی باقی می ماند که به آن یک حفره[3] یا کمبود الکترون گویند. به علت جدا شدن الکترون از هسته مربوطه، آن

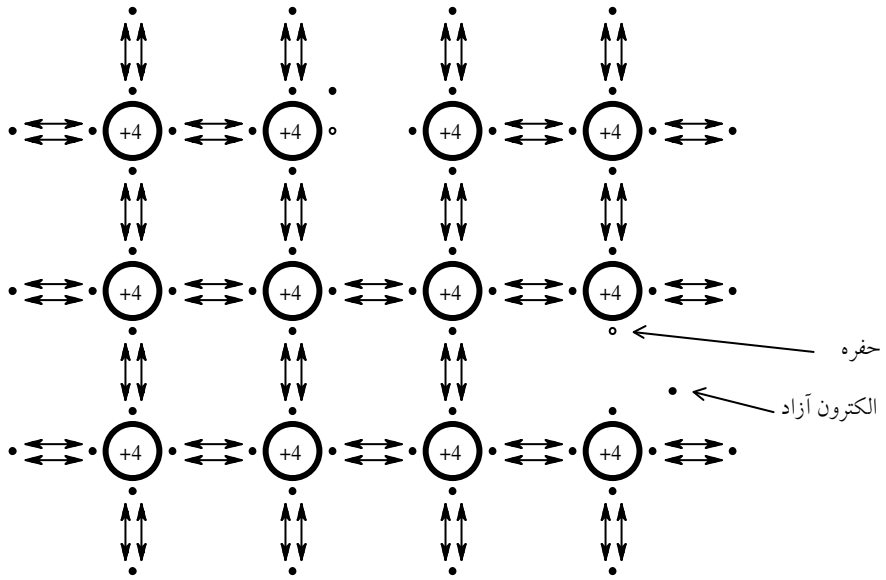
---

[1] Covalence

[2] $1eV \approx 1.6\times10^{-19} J$

[3] Hole

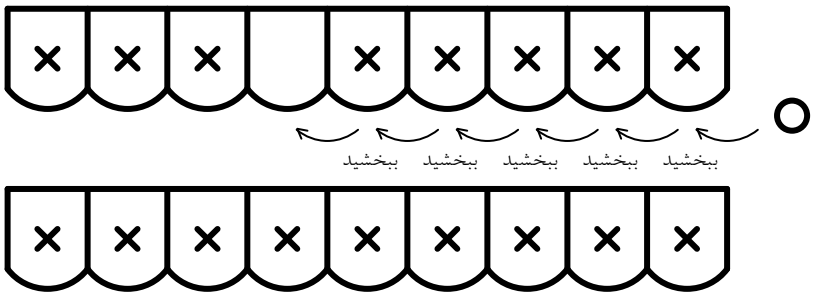
اتم دارای بار مثبت شده، تمایل به جذب یک الکترون از اتـم هـای مجـاور یـا الکتـرون هـای آزاد دارد (الکترون در حفره می افتد). توجه کنید که کل بار شبکه کریستالی خنثی است، زیرا کل تعداد الکترون ها با بار منفی، برابر است با کل تعداد حفره ها با بار مثبـت. در شـکل ٤-٣ نحـوه تـشکیل زوج الکتـرون-حفره، به صورت نمادین نمایش داده شده است.



شکل ٤-٣ نحوه تشکیل زوج الکترون- حفره

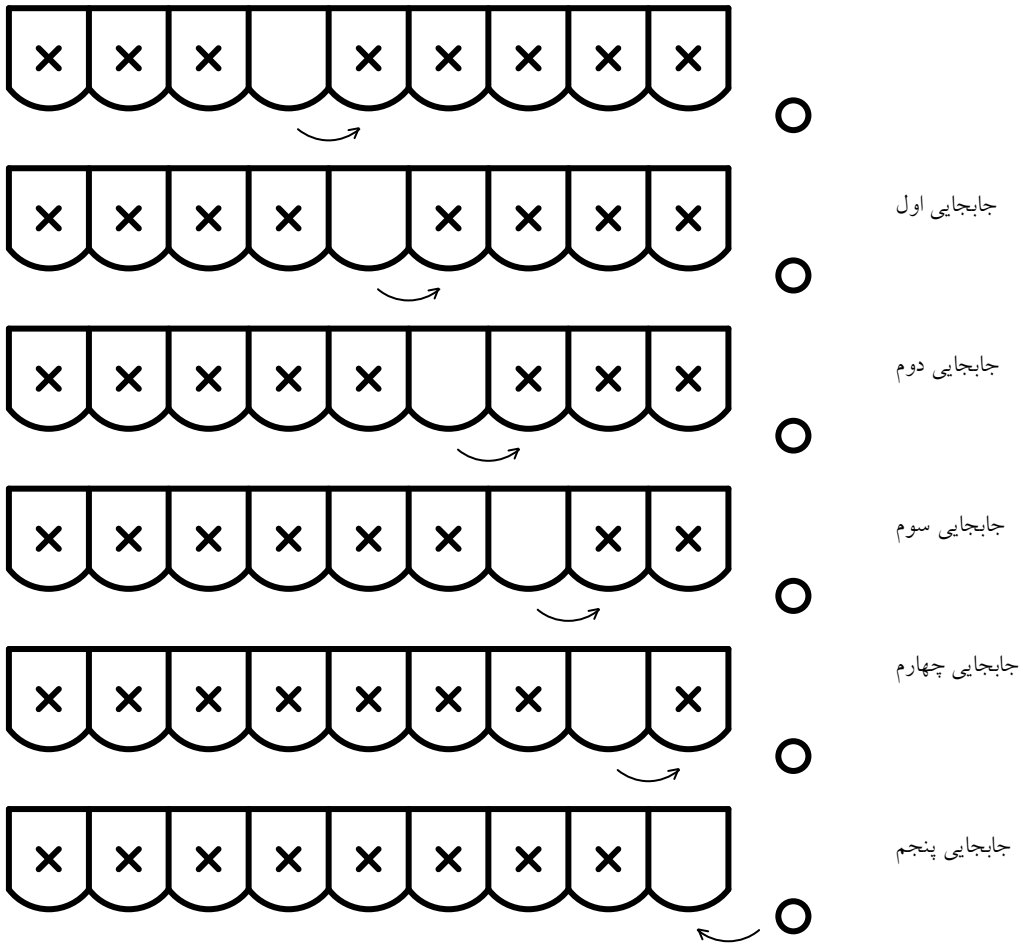
بنابراین کریستال سیلیسیوم خالص در دمای $T = 0K \equiv -273°C$ مانند یک عایق عمل می کنـد. بـا افزایش دما به تدریج تبدیل به هادی می شود. نحوه عبور جریان به عبـارت دیگـر حرکـت الکترونهـا و حفره ها را می توان با مثال زیر توصیف نمود.

فرض کنید وارد یک سالن شده اید. در یک ردیف یک صندلی خالی مشاهده می کنیـد. یـک امکـان این است که با گفتن: ببخشید، ببخشید، ببخشید، ببخشید، ببخشید، از جلوی تماشـاچیان رد شـده و بـر روی صندلی خالی بنشینید (شکل ٤-٤). در این مثال شما (دایره) به مثابه الکتـرون آزاد، صـندلی خـالی، حفره و صندلی های پر (ضربدر)، اتم های با پیوند کووالانسی هستید.



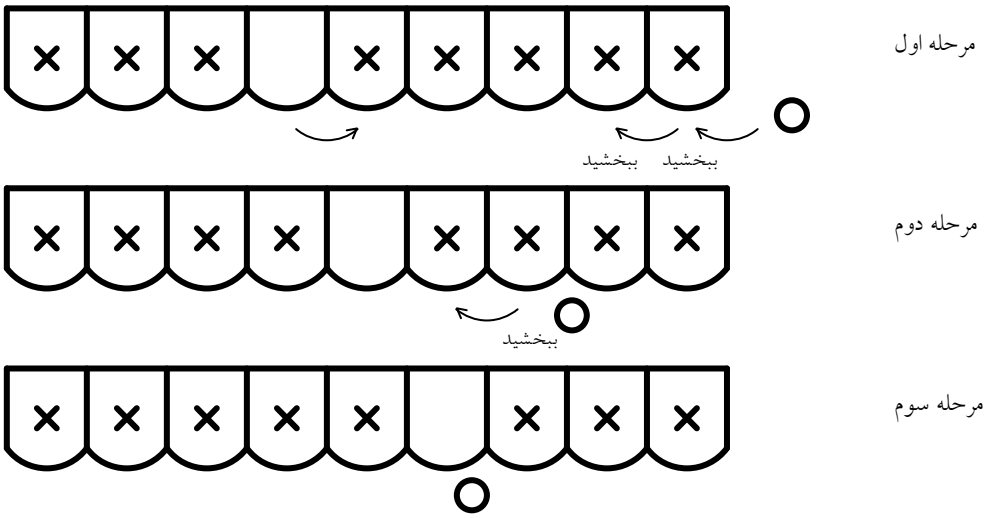
شکل ٤-٤ نحوه حرکت الکترون آزاد به سمت حفره

امکان دیگر این است که از افراد خواهش کنید جابجا شوند (شکل ٤-٥). در این صورت مثل این است که صندلی خالی به سمت شما حرکت کرده است!



شکل ٤-٥ نحوه حرکت حفره به سمت الکترون آزاد

بالاخره امکان سوم تلفیق دو امکان اول است. یعنی این که هم شما به سمت صندلی خالی حرکت کنید و هم صندلی به سمت شما حرکت کند و وسط راه به هم برسید! در شکل ٤-٦ این حالت نمایش داده شده است.



شکل ٤-٦ حرکت الکترون ها و حفره ها بسوی یکدیگر

در این مثال در زمانی که شما از جلوی سه نفر عبور کردید، دو نفر نیز از صندلی های خود جابجا شده اند. در یک شبکه کریستالی حالت سوم پیش می آید. یعنی هم الکترونها حرکت می کنند هم حفره ها. طبیعی است که همانطور که صندلی به کف سالن پیچ شده است و حرکت نمی کند، اتم ها هم در جای خود ثابت هستند و فقط شکستن پیوند های کووالانسی است که از یک اتم به اتم دیگر حرکت می کند.

حال اگر یک نفر از صندلی خود بلند شود و به خارج برود، یک جای خالی به وجود می آید که توسط یک فرد دیگر می تواند پر شود. هر قدر انگیزه برای بیرون رفتن افراد بیشتر باشد، جاهای خالی بیشتری به وجود می آید و افراد بیشتری می توانند این صندلی ها را اشغال کنند (صندلی بازی). انگیزه

بیشتر برای بیرون رفتن افراد مترادف است با دمای بیشتر، و تردد بیشتر افراد مترادف است با حرکت بیشتر الکترون ها (و حفره ها) به عبارت دیگر جریان بیشتر به عبارت دیگر مقاومت کمتر نیمه هادی.

به شکستن پیوند کووالانس و ایجاد زوج الکترون و حفره *"تولید"*[1] و به پر شدن یک حفره توسط یک الکترون آزاد *"باز ترکیب"*[2] گویند. تعداد ایجاد و باز ترکیب ها در یک نیمه هادی بستگی به جنس نیمه هادی و دمای محیط دارد.

٤-٢-٢ ناخالصی ها در نیمه هادی

دیدیم که در نیمه هادی خالص، در دمای $T = 0K$ هیچگونه هدایت الکتریکی وجود ندارد و فقط در دما های بالاتر است که تعدادی حامل بار الکتریکی یعنی الکترون های آزاد و حفره ها به وجود آمده باعث هدایت الکتریکی میشود. چگالی حامل های بارهای الکتریکی در سیلیسیم خالص[3] در دمای اتاق ($n_i(Si) = 1.5\times10^{10} cm^{-3}$) در مقایسه با الکترون های آزاد در فلزات ($n(Me) \approx 10^{23} cm^{-3}$) بسیار کم بوده، مقاومت الکتریکی نیمه هادی خالص بسیار زیاد است.

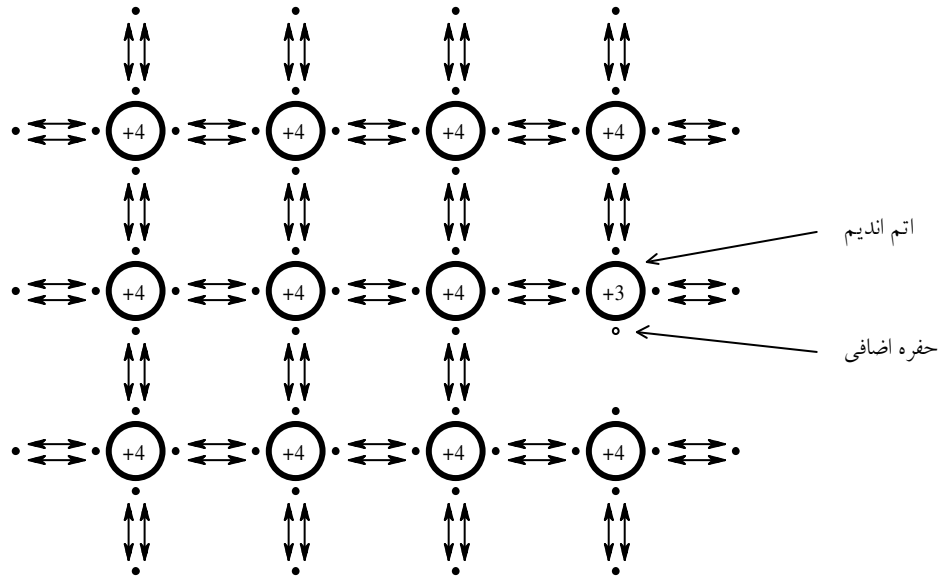
برای بالا بردن چگالی حامل های آزاد در نیمه هادی ها، می توان با افزایش مقدار ناچیزی از یک عنصر سه یا پنج ظرفیتی به کریستال آنرا تغلیظ[4] نمود. افزایش عناصر سه ظرفیتی نظیر ایندیم (In)، گالیم (Ga) یا بور (B) باعث افزایش چگالی حفره ها در شبکه کریستالی خواهد شد. به نا خالصی های سه ظرفیتی نا خالصی نوع P یا نا خالصی پذیرنده[5] گویند. همچنین افزایش عناصر پنج ظرفیتی

---

[1] Generation
[2] Recombination
[3] n_i : Intrinsic Density
[4] Doping
[5] Acceptor

نظیر آنتیموان (Sb)، فسفر (P) یا آرسنیک (As) باعث افزایش چگـالی الکتـرون هـای آزاد در شـبکه کریستالی خواهد شد. به نا خالصی های پنج ظرفیتی نا خالصی نوع N یا نا خالصی بخشنده[1] گویند.

شکل ٤-٧ قسمتی از شبکه کریستالی سیلیسیوم را که یک اتم آن با یـک اتـم ایندیم جانـشین شـده است، نمایش می دهد.



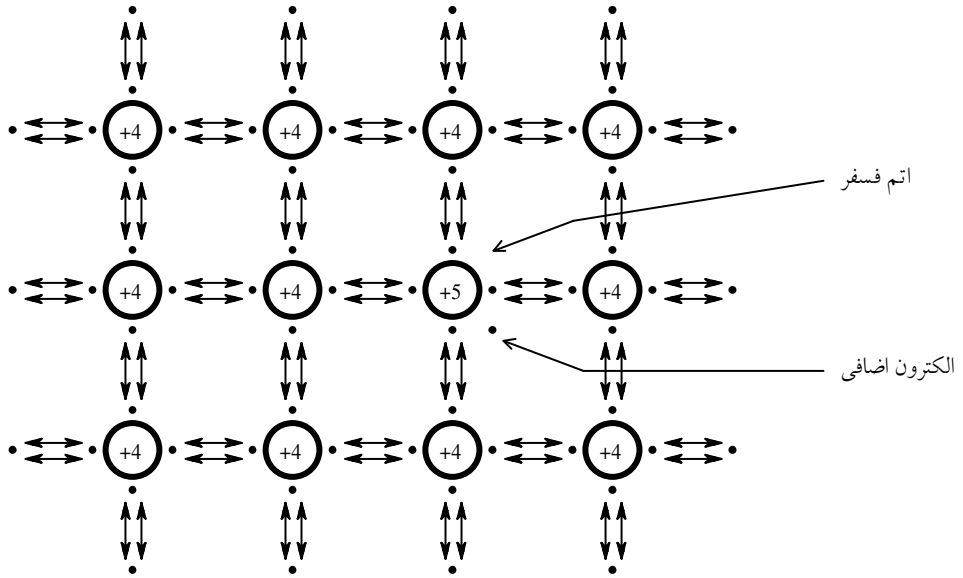
شکل ٤-٧ شبکه کریستالی سیلیسیوم با ناخالصی پذیرنده

اتم های ناخالصی سه ظرفیتی در آخرین پوسته الکترونی خود تنها سه الکترون (الکترونهای ظرفیـت) دارند. بنابراین چنان که این اتم ها به شبکه سیلیسیوم اضافه شوند، هر اتم نـا خالـصی بـا سـه الکتـرون ظرفیت خود، تنها سه پیوند کووالانس از چهار پیوند اتمهای اطراف خود را تکمیـل نمـوده بـرای پیونـد چهارم جای یک الکترون باقی می ماند. این جای خالی در واقع یک حفره جدید است کـه در کریـستال بوجود آمده است. اتم های نا خالصی در درجه حرارت اتاق به راحتی یونیزه می شوند. یونیزه شـدن بـه این معنی است که یک الکترون از یک اتم سیلیسیوم مجاور اتم ناخالصی، پیوند خود را شکـسته و ایـن حفره اضافی را پر می کند. در نتیجه این عمل یک اتم سیلیسیوم شامل حفره بوجود می آید.

[1] Donor

کریستال نیمه رسانای شامل اتم های نا خالصی سه ظرفیتی را نیمه هادی نوع P گویند. با توجه به بحث فوق در نیمه هادی نوع P – در دمای اتاق – حفره ها در پیوند های مربوط به اتم های خود نیمه هادی (و نه در پیوند های مربوط به اتم های نا خالصی) قرار دارند.

شکل ٤–٧ قسمتی از شبکه کریستالی سیلیسیوم را که یک اتم آن با یک اتم ایندیم جانشین شده است، نمایش می دهد.



شکل ٤–٨ شبکه کریستالی سیلیسیوم با ناخالصی بخشنده

اتم های ناخالصی پنج ظرفیتی – برای مثال فسفر – در آخرین پوسته الکترونی خود دارای پنج الکترون (الکترونهای ظرفیت) هستند. بنابراین چنان که این اتم ها به شبکه سیلیسیوم اضافه شوند، هر اتم نا خالصی با چهار الکترون ظرفیت خود، چهار پیوند کووالانس با اتمهای اطراف خود را تکمیل می نماید. الکترون پنجم در هیچ پیوند مشترکی قرار نگرفته، فقط وابستگی بسیار نا چیزی به هسته اتم فسفر دارد. این وابستگی آنقدر ناچیز است که در دمای اتاق با انرژی بسیار کمی از اتم مادر جدا شده، به صورت یک الکترون آزاد در اختیار شبکه کریستالی سیلیسیوم قرار می گیرد. به این ترتیب افزایش

ناخالصی نوع N، چگالی الکترون های آزاد در کریستال نیمه هادی را بالا برده آنرا به نیمه هادی نوع N تبدیل می کند.

در اینجا لازم به تذکر است که میزان نا خالصی لازم، برای این که در رسانایی یک نیمه هادی تغییر قابل توجهی ایجاد کند، بسیار نا چیز است. مثلاً به ازای هر 10^8 اتم سیلیسیوم فقط یک اتم نا خالصی قادر است تا در دمای اتاق رسانایی کریستال را حدوداً ۲٤۰۰۰ برابر کند [۲]. بنابراین با افزایش تعداد لازم ناخالصی می توان رسانایی یک نیمه هادی را (تقریباً) به اندازه دلخواه بالا برد و مقاومت آنرا در حد هادی ها پایین آورد. انتخاب مقدار مقاومت نیمه هادی یکی از مهمترین مشخصه ها و کاربردهای آن است.

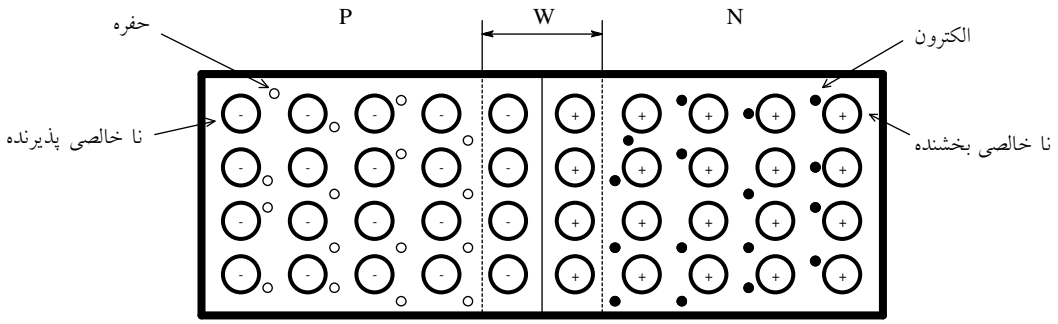
٤-۲-۳ اتصال $P-N$

یک اتصال $P-N$[1] از کنار هم قرار گرفتن نیمه هادی های نوع P و N به وجود می آید. البته چنین پیوندی را نمی توان از به هم چسبانیدن دو قطعه نیمه هادی به هم بدست آورد، زیرا در ناحیه اتصال، ساختمان کریستال باید پیوستگی خود را حفظ کند. جهت آشنایی با روش تولید کریستال، نحوه افزایش ناخالصی و ساخت اتصال $P-N$ به دروس مربوطه مراجعه نمایید.

در شکل ٤-۹ اتصال $P-N$ به طور نمادین نمایش داده شده است. با توجه به این که در ناحیه N چگالی الکترونها به مراتب بیشتر از ناحیه P است، و به عکس تراکم حفره ها در ناحیه P به مراتب بیشتر از ناحیه N است، حفره ها به سمت ناحیه N و الکترونهای آزاد به سمت ناحیه P به حرکت در می آیند. حرکت الکترونها از ناحیه N به سمت ناحیه P باعث ترکیب (خنثی) شدن حفره ها در ناحیه نزدیک اتصال می شود. همچنین حرکت حفره ها از ناحیه P به سمت ناحیه N باعث ترکیب شدن با

[1] P-N Junction

الکترون ها در ناحیه نزدیک اتصال می شود. این امر باعث ایجاد ناحیه ای به عرض W در اطراف محل اتصال می شود، که از حامل های بار الکتریکی آزاد، تخلیه شده است. به همین دلیل این ناحیه را "ناحیه تهی[1]" یا "ناحیه انتقال[2]" نامند. در بخشی از ناحیه تهی که در طرف N قرار دارد یون های مثبت ساکن، و در بخش واقع در ناحیه تهی که در طرف P قرار دارد یون های منفی ساکن قرار گرفته اند. به همین دلیل ناحیه تهی را "ناحیه بار فضایی[3]" نیز گویند. جهت میدان الکتریکی ایجاد شده در این ناحیه به گونه ای است که از انتشار بیشتر حامل های بار آزاد جلوگیری کرده، باعث محدود ماندن عرض ناحیه‌ی تهی می شود.



شکل ٤-٩ نمایش نمادین اتصال P-N

در صورتی که یک ولتاژ از خارج به اتصال P - N اعمال کنیم، در میدان الکتریکی لایه تهی اختلافی به وجود می آید. اعمال ولتاژ را به اتصال P - N "بایاس کردن[4]" آن گویند.

اگر قطب مثبت منبع ولتاژ را به نیمه هادی P و قطب منفی را به نیمه هادی N وصل کنیم، گویند اتصال "مستقیم بایاس[5]" شده است. مقدار عمده ولتاژ در محل اتصال[6] و در ناحیه تهی (فاصله W) می افتد. زیرا به علت وجود حامل های بار آزاد، قسمت های دیگر دو ناحیه، از خود مقاومت کمی نشان

---

1 Depletion Region
2 Transition Region
3 Space Charge Region
4 Biasing
5 Forward Biased
6 Junction

داده و افت ولتاژ روی آنها قابل اغماض است. به مقاومت این قسمت "مقاومت بدنه[1]" یا "مقاومت سری[2]"، و به مقاومت ناحیه تهی "مقاومت اتصال[3]" گویند. مقاومت بدنه برای نیمه هادی های متداول از چند صدم تا چند اهم است. همان طور که در بخش های بعد خواهیم دید، مقاومت ناحیه تهی، تابعی از جریان گذرنده از آن خواهد بود.

اگر مقدار ولتاژ منبع در بایاس مثبت را از صفر افزایش دهیم، چون قطب مثبت به نیمه هادی P وصل است، حفره ها تحت نیروی میدان اعمال شده به سمت ناحیه تهی رانده می شوند. از طرف دیگر چون قطب منفی به نیمه هادی N وصل است، الکترون ها نیز تحت نیروی میدان اعمال شده به سمت ناحیه تهی رانده می شوند. این امر باعث می شود که عرض ناحیه تهی کمتر، به عبارت دیگر احتمال ترکیب مجدد بین الکترونها و حفره ها، بیشتر شود. بنابراین جریان گذرنده از اتصال به شدت رو به رشد می کند. این امر یعنی کاهش مقاومت اتصال.

اگر قطب منفی منبع ولتاژ را به نیمه هادی P و قطب مثبت را به نیمه هادی N وصل کنیم، گویند اتصال "معکوس بایاس[4]" شده است. طبیعی است که در این حالت مقدار ولتاژ بیشتر از حالت قبل در ناحیه تهی می افتد (چرا؟).

اگر مقدار ولتاژ منبع در بایاس منفی را از صفر افزایش دهیم، چون قطب منفی به نیمه هادی P وصل است، حفره ها تحت نیروی میدان اعمال شده به سمت خارج جذب می شوند. از طرف دیگر چون قطب مثبت به نیمه هادی N وصل است، الکترون ها نیز تحت نیروی میدان اعمال شده به سمت خارج می روند. این امر باعث می شود که عرض ناحیه تهی بیشتر، به عبارت دیگر احتمال ترکیب مجدد بین الکترونها و حفره ها، کمتر شود. بنابراین جریان گذرنده از اتصال به شدت رو به کاهش می گذارد.

---

[1] R_B: Balk Resistance
[2] R_S: Series Resistance
[3] r_j: Junction Resistance
[4] Reverse Biased

این امر یعنی افزایش مقاومت اتصال. به علت وجود حامل های اقلیت (هر چند انـدک) بـر اثـر افـزایش ولتاژ معکوس، جریانی از اتصال $P-N$ می گذرد، که مقدار آن بستگی بـه ابعـاد نیمـه هـادی و میـزان ناخالصی دارد و تقریباً مستقل از مقدار ولتاژ اعمال شده است. به همین دلیل به این جریان "جریان اشباع معکوس[1]" گویند. مقدار این جریان بسیار کم (برای اتصال های معمولی در حد پیکو تا میکرو آمپر) بوده با افزایش انرژی به صورت حرارت، نور (فوتون)، اشعه، ... به ناحیه تهی افزایش می یابد.

[1] Reverse Saturation Current

٤-٣ مشخصات دیود نیمه هادی

هرگاه به دو سر خارجی یک اتصال $P-N$ دو قطعه سیم وصل کنیم و این مجموعه را در یک محفظه مناسب قرار دهیم، یک دیود نیمه هادی خواهیم داشت.

از دید مداری، دیود یک عنصر دو قطبی است که مشخصه $V-I$ آنرا می‌توان برای یک دیود نیمه هادی[1] بصورت تقریبی طبق رابطه (٤-١) تعریف کرد.

$$i_D \approx I_s\left(e^{v_D/nV_T}-1\right) \qquad (١-٤)$$

در این رابطه، I_s، جریان اشباع[2] یا ضریب مقیاس[3] دیود نام دارد. این مقدار برای یک دیود مشخص در دمای ثابت تقریباً ثابت است[4] و برای دیودهای معمولی $I_s \approx 10^{-14}A$ در نظر گرفته می شود. (برای انواع مختلف دیود $I_s \approx 10^{-17}\cdots 10^{-3}A$).

V_T، ولتاژ حرارتی[5] نام دارد و مقدار آن از رابطه (٤-٢) قابل محاسبه است.

$$V_T = \frac{k.T}{q} \qquad (٢-٤)$$

که در این رابطه: $k = 1.38\times10^{-23}J/K$، ثابت بولتزمن، T، دما بر حسب کلوین و $q = 1.6\times10^{-19}As$، بار الکترون میباشد. در دمای اتاق ($25^{\circ}C \equiv 298K$)، $V_T = 25.7mV$. در محاسبات، برای سادگی - در صورتی که دما مشخص نشده باشد - $V_T = 25mV$ در نظر گرفته میشود. این ولتاژ معادل دمای $T = 290K$ است. موقع استفاده از برنامه اسپایس در پنجره مربوط به گزینه دما، آنرا ١٧ ($T = 17°C$) وارد کنید (مقدار پیش فرض در این برنامه ٢٧ ($300K$) است). بالاخره nیک ضریب ثابت است که

---

[1] علاوه بر دیود نیمه هادی (Semiconductor-Diode) معمولی، دیودهای دیگری نیز وجود دارد که مشخصه آنها به فُرم های دیگری ظاهر می‌شود. امروزه، در الکترونیک – تا زمانی که نوع دیود مشخص نشده باشد - منظور همان دیود نیمه هادی معمولی است.

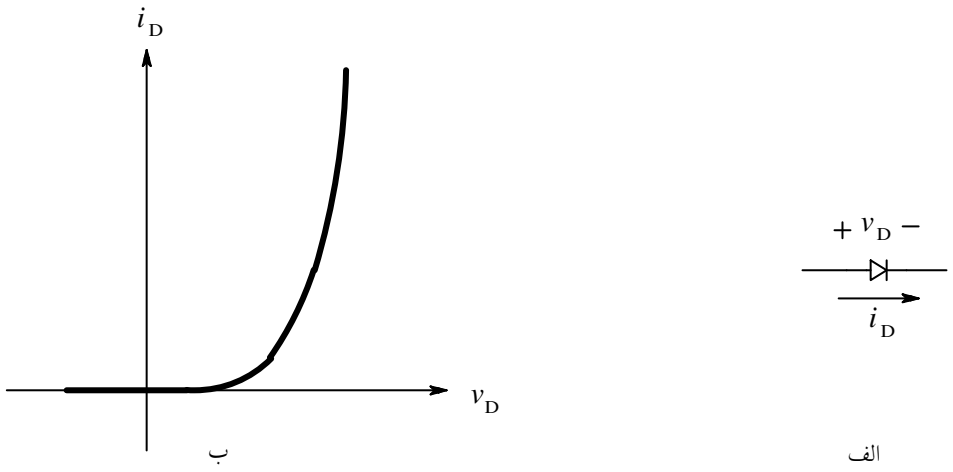
[2] Saturation Current

[3] Scaling Factor

[4] این ضریب بشدت به دما وابسته است، بطوریکه با افزایش هر 10°C .. 5، مقدار آن دو برابر میشود.

[5] Thermal Voltage

مقدار آن به نوع و جنس دیود بستگی دارد. برای اکثر دیودها $n \approx 0.5 \cdots 3.5$، برای دیودهای معمولی سیلیسیومی، $n \approx 1.8$. برای سادگی محاسبات، در صورتی که مقدار آن در مسایل داده نشده باشد، $n = 1$ فرض می‌شود. همانطور که از رابطه (٤-١) نتیجه میشود، دیود یک المان غیر خطی (تابع نمایی) است. شکل ٤-١٠ نماد و مشخصه یک دیود را نمایش میدهد.



شکل ٤-١٠ الف- نماد و ب- منحنی مشخصه یک دیود

در صورتی که جریان گذرنده از دیود را ثابت نگهداریم، با افزایش دما، به ازای هر درجه سانتیگراد ولتاژ دو سر دیود حدوداً ٢ میلی ولت کم میشود[1].

$$V_D(T_2) = V_D(T_1) - \frac{2mV}{K}\,(T_2 - T_1), \qquad I_D = Const \tag{٣-٤}$$

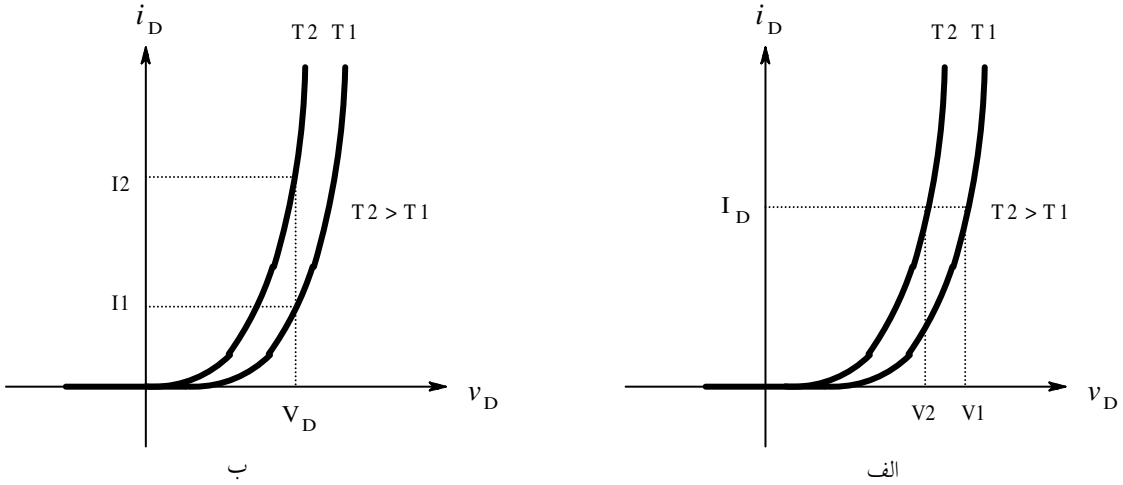
$$\left.\frac{\Delta V_D}{\Delta T}\right|_{I_D} \approx -2mV/K \tag{٣-٤ الف}$$

[1] این خاصیت را می توان در ساخت دماسنج الکترونیکی بکار برد البته مقدار $-2mV/^{\circ}C$ یک مقدار فرضی است میزان آن در دیودهای مختلف و در جریانهای متفاوت معمولاً $\frac{\Delta V_D}{\Delta T} \approx -1.6 \cdots -2.5mV/^{\circ}C$ است.

اگر ولتاژ دو سر یک دیود را ثابت نگه داریم، با افزایش هر $10^{\circ}C$، جریان دیود حدوداً دو برابر (بازار هر $30^{\circ}C$ حدوداً ده برابر) میشود[1].

$$I_D(T_2) = I_D(T_1).2^{(T_2 - T_1)/10K}, \quad V_D = Const \qquad (٤-٤)$$

شکل ٥-٢ وابستگی مشخصه دیود به دما را نمایش میدهد.



شکل ٤-١١ وابستگی مشخصه دیود به دما: الف- جریان ثابت و ب- ولتاژ ثابت

بالاخره اگر دمای دیود ثابت نگهداشته شود به ازای هر ٦٠ میلی ولت افزایش ولتاژ دو سر دیود، جریان آن حدوداً ده برابر میشود.

استدلال: با فرض $V_D >> nV_T$ از (٤-١):

$$i_D = I_s e^{v_D / n.V_T} \qquad (٤-١ \text{ الف})$$

به عبارت دیگر:

$$v_D = n.V_T \ln(i_D / I_s) \qquad (٤-٥)$$

با توجه به این که $\ln(x) = 2.3\log(x)$ و با فرض $n.V_T = 26mV$، داریم:

[1] برای کسب اطلاعات بیشتر در این زمینه‌ها به درس فیزیک الکترونیک مراجعه نمایید.

$$v_D = 60mV.\log\left(\frac{i_D}{I_s}\right) \qquad (٤-٥ \text{ الف})$$

اگر جریان دیود $i_D = I_1$ باشد:

$$V_1 \approx 60mV\log\left(\frac{I_1}{I_s}\right)$$

اگر جریان دیود $i_D = I_2$ شود:

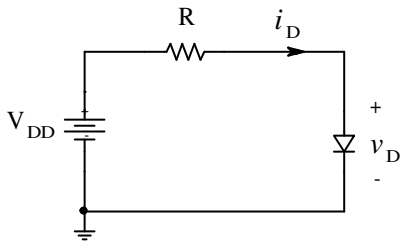
$$V_2 \approx 60mV\log\left(\frac{I_2}{I_s}\right)$$

در نتیجه:

$$V_2 - V_1 \approx 60mV\log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \qquad (٦-٤)$$

٤-٤ تحلیل *DC* مدارهای دیودی

هرگاه شبکه ای شامل یک دیود، تعدادی منبع نا بسته به دیود و تعدادی مقاومت باشد - چون به جز دیود باقی مدار خطی است - می توان از دید دیود، مدار معادل تونن بقیه‌ی شبکه را بدست آورده، یک مدار ساده دیودی را تشکیل داد. در شکل ٤-١٢ چنین مداری نمایش داده شده است. در این مدار V_{DD} ولتاژ معادل تونن و R مقاومت معادل تونن است. با فرض این که مشخصات دیود (I_s و n)، دمای دیود (T) و مقادیر V_{DD} و R معلوم باشند، می خواهیم مقادیر V_D و I_D را بدست آوریم.



شکل ٤-١٢ مدار ساده دیودی

داریم:

$$\begin{cases} V_{DD} = i_D.R + v_D \\ i_D \cong I_s e^{v_D/n.V_T} \end{cases}$$

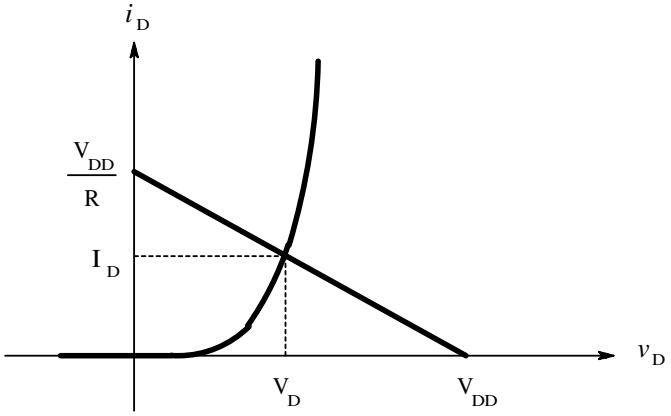
بنابراین با حل سیستم دو معادله و دو مجهولی فوق، مقادیر V_D و I_D بدست می آید:

$$V_{DD} - v_D - I_s R.e^{v_D/n.V_T} = 0, \qquad i_D = \frac{V_{DD} - v_D}{R} \qquad (٧-٤)$$

ولی از آن جایی که معادله حاصله یک تابع نمایی است، حل آن در حالت کلی از روشهای ریاضی تحلیلی، براحتی قابل محاسبه نمی باشد، یا حتی ندارد. اصولاً برای حل این گونه مسایل، دو روش ترسیمی[1] یا سعی و خطا[2] به کار گرفته می شود.

٤-٤-١ روش ترسیمی

در این روش - همانطور که از نامش پیداست - دو معادله را در یک سیستم مختصات رسم می نمایند (شکل ٤-١٣). از (٤-٧) داریم: $i_D = \frac{1}{R}(V_{DD} - v_D)$ که معادله خطی است با شیب $s = -\frac{1}{R}$. این خط محور v_D را در V_{DD} و محور i_D را در $\frac{V_{DD}}{R}$ قطع می کند. به این خط اصطلاحاً خط بار[3] گویند. معادله دیگر - مشخصه دیود - نیز در شکل ٤-١٣ رسم شده است.



شکل ٤-١٣ روش ترسیمی حل مدار شکل ٤-١٢

محل تلاقی دو منحنی را نقطه کار[4] گویند. مختصات این نقطه (V_D و I_D)، ولتاژ و جریان مطلوب مدار می باشد. اشکال این روش در این است که باید مشخصه دیود در دسترس باشد، گذشته از آن مقادیر بدست آمده دقیق نیستند. به کار گیری این روش می تواند برای درک بهتر مطلب مفید باشد.

---
[1] Graphical Analysis
[2] آزمون و خطا، Trial and Error (Iterative)
[3] Load Line
[4] Operating (Quiescent) Point

٤-٤-٢ روش سعی و خطا

در این روش در ابتدا یک مقدار اولیه برای V_D (x_1) فرض کرده، بـه کمـک آن I_D (y_1) محاسـبه می شود. به کمک مقدار حاصله (y_1) می توان V_D جدیدی را بدست آورد (x_2). حال اگر این عمل را یک بار دیگر تکرار کنیم به x_3 خواهیم رسید.

در سیستمهای همگرا[1]، x_2 از x_1 و x_3 از x_2 (همچنین y های متناظر) به مقدار واقعی نزدیکترند. این عمل را آنقدر ادامه میدهند، تا خطا به یک حد قابل قبولی برسد. برای روشنتر شـدن ایـن روش، بـه ذکر مثالی می پردازیم:

مثـال ٤-١: بـا فـرض ایـن کـه در مـدار شـکل ٤-١٢، $V_{DD} = 12V$، $R = 10k\Omega$ و بـرای دیـود $I_s = 10^{-14} A$ و $nV_T = 25mV$ فرض شود، مقادیر V_D و I_D را محاسبه نمایید.

حل: از شکل ٤-١٢ به عبارت دیگر رابطه (٤-٧):

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = \frac{12V - V_D}{10k\Omega} \qquad \text{(الف)}$$

از رابطه (٤-٥ الف):

$$V_D = 60mV.\log\left(\frac{I_D}{10^{-11}mA}\right) \qquad \text{(ب)}$$

حال با فرض یک مقـدار اولیـه بـرای V_D، معادلـه (الـف) را حـل مـی کنـیم: بـا انتخـاب[2] $V_{D_0} = 0$:

$I_{D_0} = \frac{12V - V_{D_0}}{10k\Omega} = 1.2mA$ حاصل می شود. با قرار دادن I_{D_0} در رابطه (ب):

$$V_{D_1} = 60mV.\log\frac{I_{D_0}}{10^{-11}mA} = 60mV.\log\frac{1.2}{10^{-11}} = 664.7517mV$$

---

[1] مدارهای الکترونیکی، تا زمانی که فیدبک مثبت به آنها اعمال نشده باشد، همگرا (Convergent) هستند.

[2] انتخاب مقدار اولیه نقشی در مقدار جواب نهائی ندارد، فقط اگر بتوان مقدار نهائی را حدوداً تخمین زد و این مقدار را بعنـوان مقـدار اولیـه در نظر گرفت، تعداد تکرار ها کمتر میشود.

به دست می آید.

حال یک بار دیگر این عمل را تکرار می کنیم:

$$I_{D_1} = \frac{12V - V_{D_1}}{10k\Omega} = \frac{12V - 0.66475V}{10k\Omega} = 1.1335mA$$

و

$$V_{D_2} = 60mV.\log\ \frac{I_{D_1}}{10^{-11}mA} = 60mV.\log\left(1.1335\times10^{11}\right) = 663.27mV$$

$$I_{D_2} = \frac{12V - V_{D_2}}{10k\Omega} = \frac{12V - 0.66327V}{10k\Omega} = 1.1337mA$$

در اینجا، چون اختلاف بین مقادیر بدست آمده در دور سوم، با مقادیر متناظر دور دوم چندان محسوس نیست (خطای I_D کمتر از ۰,۰۰٦٪ و خطای V_D کمتر از ۰,۱۱٪ (چرا؟)) می توان جواب مسئله را $V_D = 664mV$ و $I_D = 1.1337mA$ در نظر گرفت.

چنانچه دقت بیشتری مد نظر باشد، تعداد تکرار ها را بیشتر می کنیم. در جدول ٤-۱ خلاصه مطالب ذکر شده جمع بندی شده است.

جدول ٤-۱ به کار گیری روش سعی و خطا برای محاسبه نقطه کار مدار شکل ٤-۱۲

j	$V_j[mV]$	$E_{r_{\max}}(V)$ [%]	$I_j[mA]$	$E_{r_{\max}}(I)$ [%]
0	0	-	1.2	-
1	664.7517	-	1.13353	-2.8
2	663.2666	-0.1117	1.13367	+0.006
3	…	…	…	…

تذکر: در این مثال هر قدر V_{DD} و R بزرگتر باشند زودتر به جواب می‌رسیم (چرا؟).

تمرین: مثال فوق را برای $V_{DD} = 1V$ و $R = 100\Omega$ تکرار کنید.

٤-٤-٣ محاسبه تقریبی

بـرای اکثـر دیودهـای معمـولی $I_s \approx 10^{-15}...10^{-13}\,A$ و در اکثـر مـدارهای دیـودی، در نقطـه کـار $I_D = 10\mu A \cdots 10mA$ می‌باشد. با توجه به رابطه (٤-٥ الف):

$$V_D = 60mV \cdot \log\left(\frac{I_D}{I_s}\right) = 480 \cdots 780mV \qquad (٨-٤)$$

بنابراین می توان گفت در اکثر مواقع، مستقل از مدار و نوع دیود، افت ولتاژ دو سر دیودهای سیلیسیومی در نقطه کار $V_D \approx 0.5 \cdots 0.8V$ است. به همین دلیل در محاسبات معمولاً $V_D = 0.6V$ یـا $V_D = 0.7V$ فرض می شود.

در عمل بعلت این که پارامترهای دیود بطور تقریبی انتخاب و محاسبه می‌شوند (مـثلاً $n = 1$ فـرض می شود، در صورتی که ممکن است برای دیود مورد نظر $n = 1.2$ باشد، یعنـی ١٧٪- خطـا). یـا مقـادیر V_D، V_T و I_s که تابعی از دما هستند. از آن جایی که مشخصات دیود به جریان نقطه کار وابسته است (ر. ک. به رابطه (٤-٢٨)) و جریان نقطه کار که عمدتاً توسط V_{DD} و R مشخص می شود (چـرا؟)، در عمل برای محاسبه دستی، نیاز به کار گیری روش سعی و خطا نیست! (*PSpice* یا برنامه‌های مـشابه، از این روش استفاده می کنند). برای مثال اگر $V_D = 0.6V$ فرض شود:

$$I_D = \frac{12V - 0.6V}{10k\Omega} = 1.14mA$$

حاصل می شود که خطای محاسباتی در مقایسه با روش سعی و خطا (جدول ٤-١) فقط:

$$E_r = \frac{1.14mA - 1.13367mA}{1.13367mA} = +0.558\%$$

و اگر $V_D = 0.7V$ فرض شود:

$$I_D = \frac{12V - 0.7V}{10k\Omega} = 1.13mA$$

$$E_r = \frac{1.13 - 1.13367}{1.13367} = -0.324\%$$

خواهد بود، که این خطا به مراتب کمتر از تلرانس پارامترهای دیود و سایر عناصر مدار است! هر قدر $V_{DD} > V_D \approx 0.7V$ باشد، دقت محاسبات بیشتر خواهد بود(چرا؟). بنابراین اگر در مسایل شرط خاصی نباشد، $V_D = 0.7V$ انتخاب می شود.

٤-٥ مدل های دیود

همانطور که میدانیم، برای استفاده از عناصر در مدار باید آنها را به کمک روابط ریاضی توصیف کرد، که این عمل را مدلسازی گویند. یکی از مدلهای ساده شده دیود ها همان رابطه (٤-١) است. دلیل این که میگوییم "*ساده شده*" این است که در این مدل فقط دو پارامتر I_s و n تعریف شده اند. در صورتی که مثلاً *PSpice* برای دیود ١٤ پارامتر تعریف می کند! ولی همین دو پارامتر هم در اکثر مواقع حل مسئله را بسیار مشکل می کنند، زیر این مدل توسط یک رابطه نمایی تعریف شده است. در بسیاری از مواقع مدار ها به مراتب پیچیده تر از مدار شکل ٤-١٢ به عبارت دیگر مثال ٤-١ هستند. مثلاً مدار ممکن است علاوه بر مقاومتها، شامل سلف و خازن باشد. در خیلی از مدارها به جای یک دیود ممکن است تعداد زیادی دیود وجود داشته باشد. در چنین مواقعی حل مدار منجر به حل یک سیستم چند معادله چند مجهولی، دیفرانسیل غیر خطی (نمایی) می شود، که حل آن به روش تحلیلی (دستی) عملاً غیر ممکن است. حتی روش سعی وخطا هم به جز به کمک کامپیوتر امکان پذیر نیست. بنابراین در چنین مواقعی از تقریب های خطی استفاده می شود. دو مدل تقریبی برای دیود تعریف می شود: مدل علایم کوچک (که دامنه ولتاژ سیگنال دیود در حد چند میلی ولت است)، و مدل علایم بزرگ (که دامنه ولتاژ سیگنال دیود در حد چند ولت است).

٤-٥-١ مدل علایم کوچک دیود

همان‌طور که ذکر شد، بعلت اینکه دیود یک عنصر غیر خطی است و حل معادلات غیرخطی معمولاً پیچیده هستند، در خیلی از مواقع از تقریب‌های خطی استفاده می‌شود.

در بخش قبل دیدیم که افت ولتاژ دوسر دیود و جریان گذرنده از آن - تا هنگامی که ولتاژ منبع تغذیه و مقاومت مدار (V_{DD} و R در مدار شکل ٤-١٢) ثابت هستند - نقطه ای از منحنی مشخصه دیود را بیان می کنند (نقطه ای با مختصات (V_D , I_D) در شکل ٤-١٣). در صورتی که V_{DD} تغییر کند، V_D و I_D نیز تغییر خواهند کرد. تغییرات V_D و I_D متناظر است با حرکت نقطه بر روی منحنی مشخصه دیود. از آن جایی که سیگنال[1] عبارت است از تغییرات ولتاژ (یا جریان)[2]، در صورتی که تغییرات ولتاژ دو سر دیود کم باشد، اصطلاح "*علایم کوچک*[3]" و در غیر این صورت اصطلاح "*علایم بزرگ*[4]" به کار می‌رود. میزان تغییرات ولتاژ دو سر دیود برای اطلاق اصطلاحات فوق الذکر مقدار مشخصی ندارد و عملاً جزء کوچکی از ۰,۷ ولت است. در خیلی از موارد حداکثر دامنه ولتاژ بر روی دیود را به عنوان علایم کوچک، ۱۰ میلی ولت در نظر می‌گیرند.

یاد آوری: برای مشخص کردن کمیات الکتریکی معمولاً از دو (یا بیشتر) حرف استفاده می‌شود. حرف اول مبین کمیت فیزیکی (مثلاً ولتاژ) است. حروف بعدی که به صورت اندیس برای حرف اول نوشته می‌شود عنصر مربوطه را مشخص می‌کند. مثلاً: V_D یعنی افت ولتاژ دو سر دیود، I_D: جریان

---

[1] علامت ، Signal

[2] ر. ک. فصل ۱-۲

[3] Small Signal

[4] Large Signal

گذرنده از دیود، V_{AK}: ولتاژ بین آند و کاتد، R_L: مقاومت بار، V_{Ref}: ولتاژ مرجع، ... . برای یک کمیت الکتریکی چهار مقدار قابل تعریف است:

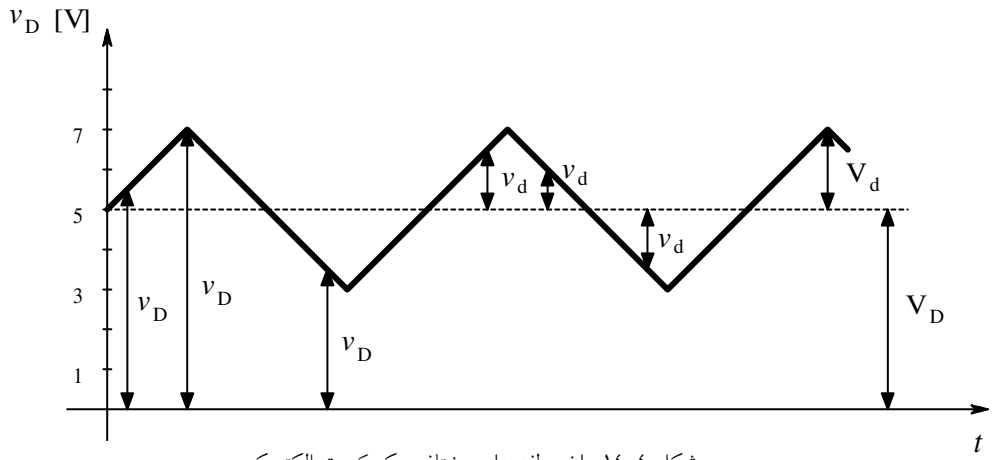
۱. **مقدار لحظه‌ای:** مقدار واقعی که متغییر در هر لحظه دارد. برای نمایش این مقدار، از حرف اصلی کوچک و اندیس بزرگ استفاده می کنند. مثلاً: v_D (مقادیر متغیر را با حروف کوچک و مقادیر کل را با حروف بزرگ نمایش می‌دهند).

۲. **مقدار متوسط:** مؤلفه DC یک کمیت بنا به تعریف مقدار متوسط آن است. برای نمایش این مقدار، از حرف اصلی و اندیس بزرگ استفاده می کنند. مثلاً: V_D (مقادیر ثابت را با حروف بزرگ و مقادیر کل را با حروف بزرگ نمایش می‌دهند).

۳. **مقدار سیگنال:** مؤلفه AC یک کمیت بنا به تعریف جزء متغیر آن است. برای نمایش این مقدار از حرف اصلی و اندیس کوچک استفاده می کنند. مثلاً: v_d (مقادیر متغیر را با حروف کوچک و مقادیر جزء را با حروف کوچک نمایش می‌دهند).

٤. **مقدار دامنه:** دامنه سیگنال بنا به تعریف حداکثر مقدار تغییرات یک کمیت نسبت به مقدار متوسط آن است. برای نمایش این مقدار از حرف اصلی بزرگ و اندیس کوچک استفاده می کنند. مثلاً: V_d (مقادیر ثابت را با حروف بزرگ و مقادیر جزء را با حروف کوچک نمایش می‌دهند).

شکل ٤-١٤ به عنوان یک مثال، تعاریف ذکر شده را برای ولتاژ دو سر یک دیود بیان می‌دارد.



شکل ٤-١٤ بیان مولفه های مختلف یک کمیت الکتریکی

همانطور که ملاحظه می‌شود همواره:

$$v_D = V_D + v_d \qquad (٩-٤)$$

یعنی این که در حالت کلی یک کمیت الکتریکی از یک مؤلفه DC (نقطه کار، بایاس) و یک مؤلفه AC (سیگنال) تشکیل شده است. در مثال فوق سیگنال یک موج مثلثی متقارن با دامنه دو ولت است که در ۵ ولت بایاس شده است. بنابراین:

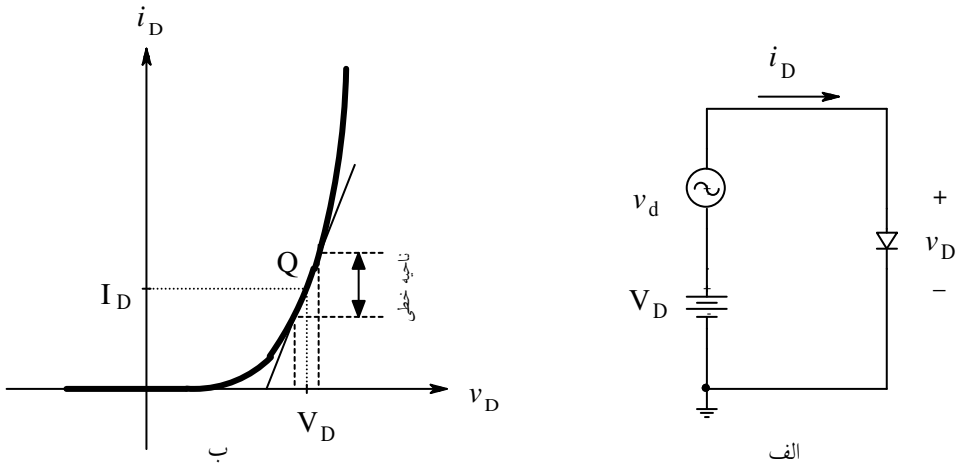
$v_D = 3\cdots 7V$ مقدار لحظه ای ولتاژ (متغیر با زمان)

$v_d = -2\cdots 2V$ مؤلفه AC، سیگنال، (متغیر با زمان)

$V_D = 5V$ مؤلفه DC، ولتاژ نقطه کار، مقدار متوسط، (ثابت نسبت به زمان)

$V_d = 2V$ دامنه سیگنال (ثابت نسبت به زمان)

شکل ٤-١٥ را در نظر بگیرید. فرض کنید $V_D = 0$ و $V_d = 1mV$ و مشخصات دیود: $I_s = 10\,fA$، $n = 1$ و $V_T = 25mV$ باشد، در این صورت $i_D = 0$ خواهد بود (چرا؟)



شکل ٤-١٥ الف- بایاسینگ دیود ب- به کار گیری آن در ناحیه خطی

همانطور که از رابطه (٤-١) و شکل ٤-١٥ ب نتیجه می‌شود، برای این که تغییرات ولتاژ دیود باعث تغییرات جریان آن شود باید یک نقطه بر روی منحنی مشخصه دیود انتخاب کرد[1] که در آن $V_D \approx 0.6 \cdots 0.7V$ باشد[2]. به این عمل اصطلاحاً "بایاس کردن[3]" گویند. از دروس ریاضی می‌دانیم که اگر تغییرات یک متغیر حول یک نقطه از منحنی کم باشد، می‌توان آن منحنی را با خط مماس بر منحنی در آن نقطه، تقریب زد. هرچه میزان این تغییرات کمتر باشد، دقت محاسبات بیشتر است. و اما مماس بر منحنی در نقطه ای مشخص، یعنی شیب منحنی در آن نقطه، که به کمک مشتق گیری بدست می‌آید. بنابراین با جانشینی منحنی با مماسش، به یک مدل خطی دست یافته ایم. چون این مدل در محدوده‌ی تغییرات کمی از متغیر ورودی قابل استفاده است به آن مدل علایم کوچک[4] گویند.

[1] نقطه کار (ر. ک. به فصل ٤-٤-١)
[2] ر. ک. به فصل ٤-٤-٣
[3] Bias, Biasing
[4] Small Signal Model

یادآوری: کمیت نسبت یک ولتاژ به یک جریان معادل با کمیت مقاومت است. برای عناصر غیر خطی مقدار این نسبت ثابت نیست و بستگی به انتخاب نقطه کار دارد. برای عناصر غیر خطی دو نوع مقاومت تعریف می کنند، مقاومت استاتیکی[1] و مقاومت دینامیکی[2].

بنا به تعریف، مقاومت استاتیکی یک المان عبارت است از نسبت اختلاف پتانسیل دو سر آن به جریان گذرنده از آن، در نقطه کار:

$$R_{Stat} = \frac{V}{I}\bigg|_{Q} \qquad (۱۰-٤)$$

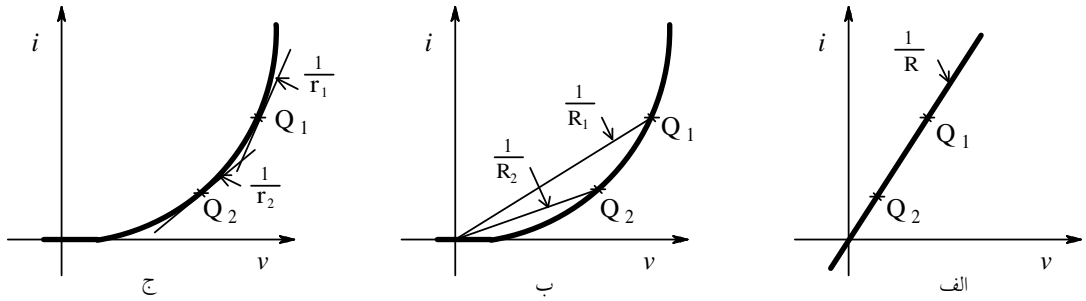
بنا به تعریف، مقاومت دینامیکی یک المان عبارت است از نسبت تغییرات اختلاف پتانسیل دو سر آن به تغییرات جریان گذرنده از آن، در نقطه کار:

$$r_{dyn} = \frac{\partial\, v}{\partial\, i}\bigg|_{Q} \qquad (۱۱-٤)$$

شکل ٤-١٦ مقاومت استاتیکی و دینامیکی یک المان خطی و یک المان غیر خطی را برای دو نقطه کار نمایش می‌دهد.

[1] مقاومت ایستا، Static Resistance

[2] مقاومت پویا ، Dynamic Resistance



شکل ٤-١٦ الف- مقاومت استاتیکی و دینامیکی یک المان خطی، ب- مقاومت استاتیکی یک المان غیر خطی و ج- مقاومت دینامیکی آن عنصر، در دو نقطه کار Q_1 و Q_2

همانطور که مشاهده میشود، برای المان خطی، مقاومت استاتیکی و مقاومت دینامیکی به ازای هر نقطه کار مقداری ثابت است. به همین دلیل برای المان‌های خطی از اصطلاح استاتیکی و دینامیکی استفاده نمی کنند. حتی برای این که مشخص کنند مقاومت خطی است، از اصطلاح "*مقاومت اهمی*[1] " استفاده می‌شود.

در عمل تقریباً همیشه مقاومت دینامیکی حایز اهمیت است (چرا؟). مقدار مقاومت دینامیکی یک دیود به کمک روابط (٤-١) و (٤-١١) بدست می آید. تقریباً از رابطه (٥-٢٨) بدست می‌آید.

$$i_D \approx I_s\left(e^{v_D/nV_T} - 1\right) \approx I_s\, e^{v_D/nV_T} \qquad (٤\text{-}١\text{ الف})$$

$$\frac{1}{r_d} = \left.\frac{\partial\, i_D}{\partial\, v_D}\right|_{\mathrm{I_D}} \approx \frac{1}{nV_T} I_s\, e^{V_D/nV_T} = \frac{I_D}{nV_T}$$

$$r_d \approx \frac{nV_T}{I_D} \qquad (١٢\text{-}٤)$$

در این رابطه r_d مقاومت دینامیکی دیود به ازای جریان نقطه کار I_D است. با فرض $n = 1$ و $V_T = 25mV$:

[1] Ohmic Resistance

$$r_d = \frac{25}{I_D} \quad [\Omega,\ mA] \qquad (۱۲-٤ \text{ الف})$$

مفهوم این رابطه این است که، به ازای جریان نقطه کار یک میلی آمپر مقاومت دینامیکی دیود ۲۵ اهم است؛ به ازای یک میکرو آمپر، ۲۵ کیلو اهم و به ازای ۵۰ میکرو آمپر، ۵۰۰ اهم. یعنی دیود برای جریانهای متناوب با دامنه کم مانند یک مقاومت معمولی (اهمی) عمل میکند که مقدار آن توسط مولفه جریان مستقیم گذرنده از دیود تعیین می‌شود (مقاومت قابل تنظیم).

طبیعتاً چون دیود یک عنصر غیر خطی است، جانشینی آن با یک المان خطی (r_d)، فقط به ازای محدوده کمی از تغییرات ولتاژ دو سر آن (یعنی دامنه سیگنال)، مجاز است! در خیلی از مواقع استفاده از رابطه فوق را برای دامنه ولتاژ کمتر از ده میلی ولت، مجاز می‌دانند.

$$V_P \leqslant 10mV \qquad (۱۳-٤)$$

در روابط فوق: r_d مقاومت دینامیکی دیود، I_D جریان گذرنده از دیود و V_D افت ولتاژ دو سر آن در نقطه کار، v_D و i_D به ترتیب، ولتاژ لحظه ای (متغیر) و جریان لحظه ای (تابع) دیود، V_T، n و I_S پارامترهای آن (منحنی مشخصه شکل ٤-۱۰ به عبارت دیگر رابطه (٤-۱)) می‌باشند.

حال می‌خواهیم محدوده مجاز محاسبات را بدست آوریم. از (٤-۱ الف) و با توجه به این که:

$$i_D = I_D + i_d \quad , \quad v_D = V_D + v_d \qquad (۱٤-٤)$$

حاصل می‌شود:

$$I_D \cong I_s e^{V_D / n.V_T} \qquad (۱۵-٤)$$

و:

$$i_D = I_s e^{(V_D+v_d)/n.V_T} \qquad (۱۶-٤)$$

به عبارت دیگر:

$$i_D = I_s e^{V_D/n.V_T}.e^{v_d/n.V_T} = I_D.e^{v_d/n.V_T} \qquad (۱۷-٤)$$

در دروس ریاضی خواهید آموخت (سری تیلر[1]) که:

$$e^x = 1 + x + \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{6}x^3 + \cdots + \frac{1}{n!}x^n + \cdots \qquad (۱۸-٤)$$

اگر دامنه سیگنال باندازه کافی کوچک باشد، به عبارت دیگر: $\frac{V_d}{n.V_T} << 1$ از (۱۸-٤) و جانشینی $x = \frac{V_d}{n.V_T}$، رابطه (۱۷-٤) به صورت:

$$i_D \approx I_D\left(1 + \frac{v_d}{n.V_T}\right) \qquad (۱۹-٤)$$

حاصل می‌شود. این رابطه "*تقریب علایم کوچک*[2]" دیود است. محدوده اعتبار این مدل خطی به میزان خطای مجاز بر میگردد.

محاسبه خطا: بنا به تعریف:

مقدار واقعی: $y = e^x$

مقدار تقریب زده شده: $y' = (1 + x)$

تعریف خطای نسبی: $E_r = \frac{y' - y}{y}$

از آنجا:

$$E_r = \frac{1 + x - e^x}{e^x} \qquad (۲۰-٤)$$

---

[1] Tylor
[2] Small Signal Approximation

در جدول ٤-٢ مقدار خطا برای چند مقدار مختلف x به عبارت دیگر دامنه سیگنال به ازای $n.V_T = 25mV$، نمایش داده شده است:

جدول ٤-٢ رابطه بین دامنه سیگنال و میزان خطا در مدل خطی دیود

x [1]	0.02	0.05	0.1	0.2	0.4	0.5	1
V_d $(n.V_T = 25mV)$ $\lfloor mV_p \rfloor$	0.5	1.25	2.5	5	10	12.5	25
E_r [%]	-0.02	-0.12	-0.47	-1.75	-6.2	-9.0	-26.4

با توجه به این که $x = \frac{v_d}{nV_T}$، با فرض $n \cdot V_T = 25mV$، اگر دامنه سیگنال $V_d < 13mV$ باشد خطای محاسباتی کمتر از ١٠٪ حاصل می‌شود. خطای سیگنالهای با دامنه کمتر از ٤ میلی ولت کمتر از حدود ١٪ خواهد بود بنابراین عملاً، چون خطاهای حدود ٥٪ در الکترونیک مجاز است، معمولاً مدل دیود را برای سیگنال‌های با دامنه کمتر از ١٠ میلی ولت می توان خطی (یک مقاومت) در نظر گرفت.

توجه شود که خطای ناشی از تقریب خطی دیود، همواره منفی است، بعبارت دیگر مقدار محاسبه شده به کمک مدل خطی دیود همواره کمتر از مقدار واقعی (تابع نمایی) است! (چرا؟)

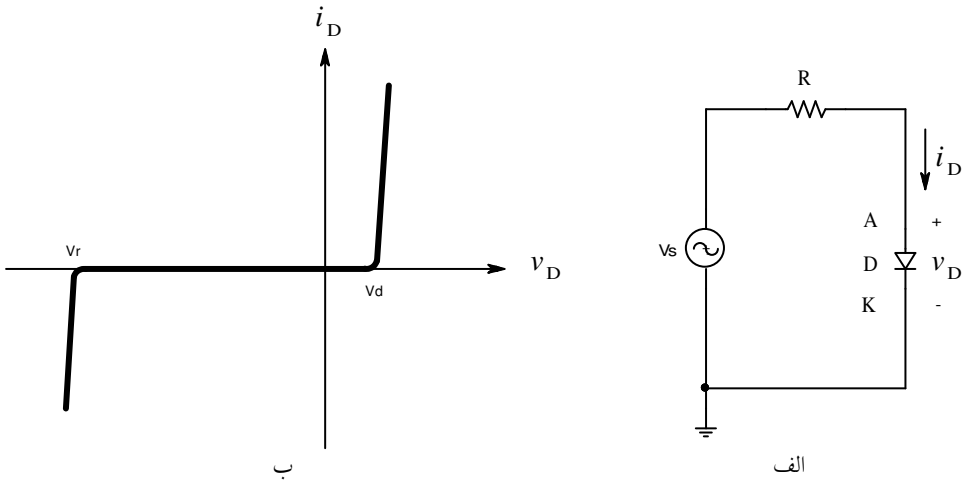
٤-٥-٢ مدل علایم بزرگ دیود

در صورتی که یک منبع ولتاژ متناوب با دامنه بزرگ (مثلاً ١٠٠ ولت) را مطابق شکل ٤-١٧ الف به یک دیود اعمال کنیم، مشخصه آن به صورت نمودار شکل ٤-١٧ ب خواهد بود.

طبق رابطه (٤-١) و همانطور که در شکل ٤-١٧ ب مشهود است، تا زمانی که ولتاژ منبع حدوداً $0 \leqslant v_S \leqslant 0.5V$ باشد، جریان گذرنده از دیود به حدی کم است، که افت ولتاژ دو سر مقاومت قابل

اغماض بوده $v_D \approx v_S$ و $i_D \approx 0$. در این صورت گویند دیـود در حالـت قطـع[1] قـرار دارد. بـه ازای $V_D \approx V_S \approx 0.6V$ بتدریج جریان دیود و در نتیجه افت ولتاژ دو سر مقاومت شروع به رشد کرده، پس از آن ولتاژ دو سر دیود تقریباً ثابت می‌ماند. این ولتاژ (V_d در شکل ٤-١٧ ب) ولتاژ آستانه[2] نامیـده مـی شود و معمولاً آن را با V_d، $V_{D_{ON}}$، V_{DO}، V_f، یا V_γ و غیره نمایش می‌دهند.

با افزایش v_S، افت ولتاژ دو سر دیود دیگر تغییـر محـسوسی نخواهـد کـرد و حـد اکثـر بـه حـدود $V_D \approx 0.8 \cdots 0.9V$ خواهد رسید.



شکل ٤-١٧ الف- دیود در یک مدار با منبع ولتاژ متناوب، ب- منحنی مشخصه کامل دیود.

هنگامی که افت ولتاژ دو سر دیود مثبت باشد ($V_D > 0$) گویند دیود در جهت مستقیم بـه کـار رفتـه است. و اگر افت ولتاژ دو سر دیود منفی باشد ($V_D < 0$) گویند دیود در جهت معکـوس بـه کـار رفتـه است. در صورتی که دیود در جهت معکوس قرار گرفته باشد، از رابطه (٤-١) نتیجه می‌شود:

$$i_D = I_s\left(e^{v_D / nV_T} - 1\right) \qquad (١-٤)$$

[1] Cut-Off

[2] ولتاژ درگاهی، ولتاژ دیفوزیون، Cut-In Voltage, Diffusion Voltage

$0 > i_D > -I_s$ - به عبارت دیگر $i_D \approx 0$. بنابراین در جهت معکوس دیود قطع است (تقریباً مانند یک مدار باز عمل می کند). با افزایش ولتاژ معکوس، به تدریج رابطه (٤-١) اعتبار خود را از دست می‌دهد، به طوری که به ازای $V_D \approx V_r$ جریان دیود در جهت منفی بشدت رشد می کند (شکل ٤-١٧ ب). به V_r ولتاژ شکست[1] گویند که اغلب آن را با BV، V_{BD}، $V_{\max}$، V_R، $V_{R_{\max}}$، ... نمایش می‌دهند. در حالت کلی افت ولتاژ دو سر دیود باید کمتر از ولتاژ شکست باشد، زیرا در غیر این صورت - اگر جریان دیود توسط مقاومت خارجی به حد مجاز محدود نشود - به علت توان تلف شده بیش از حد، دیود معیوب می‌شود (اصطلاحاً می‌گویند دیود می‌سوزد).

یادآوری: به علت این که جهت ولتاژ دو سر دیود مهم است، پایه‌های آن را مشخص می کنند (شکل ٤-١٧ الف). معمولاً به پایه‌های اجزای الکتریکی الکترود[2] گویند. الکترودهای دیود آند[3] و کاتد[4] نامیده می‌شوند. در جهت مستقیم اختلاف پتانسیل آند نسبت به کاتد مثبت است، و به عکس.

همانطور که ذکر شد[5]، مدل کردن یک المان، یعنی توصیف ریاضی خواص فیزیکی آن عنصر. به علت پیچیدگی رفتاری یک المان واقعی، مدلسازی دقیق آن عملاً امکان پذیر نمی‌باشد. به همین دلیل بسته به نیاز در دقت محاسبات، مدل‌های متفاوتی برای یک المان تعریف می کنند. برای مثال رابطه (٤-١) یک مدل تقریبی ساده شده دیود است، که فقط با دو پارامتر تعریف شده است. خطای این مدل برای افت ولتاژ بیش از ۰,۹ ولت در جهت مستقیم یا چند ولت در جهت معکوس خیلی زیاد خواهد بود؛ ناحیه شکست را هم اصلاً در نظر نمی‌گیرد. به همین دلیل برای دیود مدل‌های پیچیده‌تری تعریف می کنند، که از حوصله این درس خارج است. برای مثال در اسپایس برای دیود ۱۵ پارامتر تعریف شده است!

---

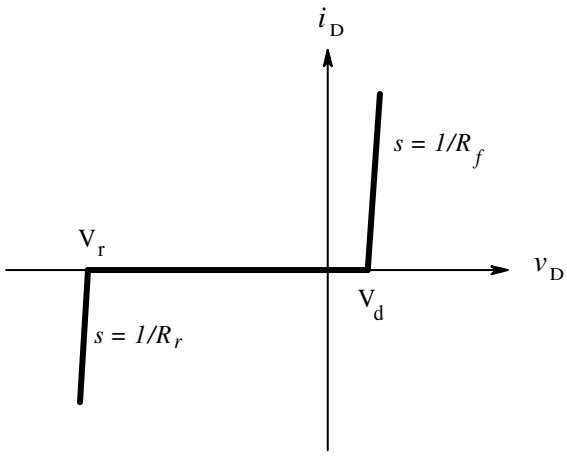
[1] Breakdown Voltage
[2] Electrode
[3] Anode
[4] Cathode
[5] ر. ک. به فصل ۱-۲

از طرف دیگر، برای محاسبات سریع دستی، حتی رابطه (٤-١) نیز بسیار پیچیده است[1]. لذا در بسیاری از موارد، مدل‌های ساده‌ی خطی شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. تصمیم گیری برای این که از کدام مدل باید استفاده کرد، به صورت مسئله بر می‌گردد.

همانطور که در شکل ٤-١٧ ب مشخص است، سه ناحیه کاری برای دیود قابل تفکیک است:

- ناحیه قطع: $V_r < v_D < V_d$
- ناحیه وصل مستقیم: $v_D > V_d$
- ناحیه وصل معکوس: $v_D < V_r$

علاوه بر آن با توجه به این که محدوده‌های گذر از قطع به وصل - در مقایسه با این نواحی - بسیار کم است، می‌توان نمودار شکل ٤-١٧ ب را تقریب خطی زده، به صورت شکل ٤-١٨ نمایش داد. بنابراین مدل خطی دیود را می‌توان با رابطه (٤-٩) تقریب زد. در این رابطه: v_D مقدار لحظه ای افت ولتاژ دو سر دیود، i_D جریان گذرنده از آن، V_r ولتاژ شکست، V_d ولتاژ آستانه، R_r مقاومت دیود در جهت معکوس و R_f مقاومت دیود در جهت مستقیم می‌باشد.

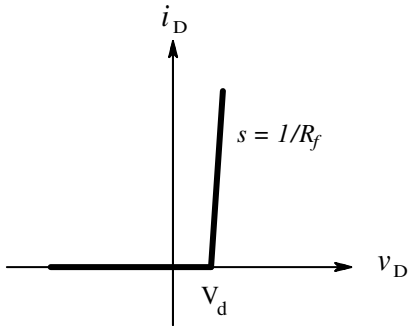


شکل ٤-١٨ مدل پاره خطی دیود

$$i_D = \begin{cases} \dfrac{v_D - V_r}{R_r} & for \quad v_D < V_r \\ 0 & for \quad V_r < v_D < V_d \\ \dfrac{v_D - V_d}{R_f} & for \quad v_D > V_d \end{cases} \qquad (٢١-٤)$$

[1] ر. ک. به فصل ٤-٤

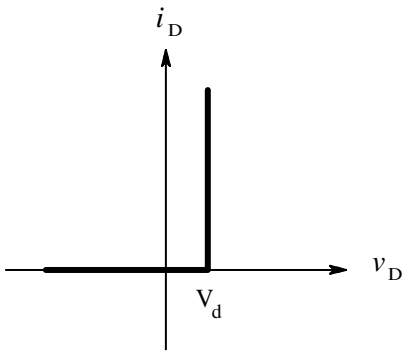
از آنجایی که برای دیودهای معمولی – در حالت عادی – سیگنال ورودی مجاز نیست از ولتاژ شکست تجاوز نماید، در این موارد می‌توان مدل را ساده‌تر در نظر گرفت (شکل ۵–۷ و رابطه (٤–۲۱)).



شکل ٤–۱۹ مدل ساده شده دیود

$$i_D = \begin{cases} 0 & for \quad v_D < V_d \\ \dfrac{v_D - V_d}{R_f} & for \quad v_D > V_d \end{cases} \qquad (٢٢–٤)$$

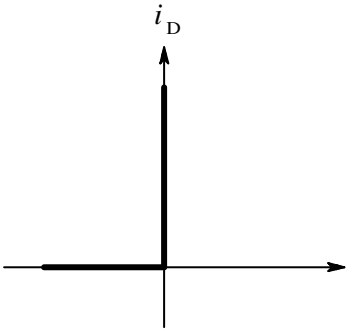
مقدار R_f برای دیودهای معمولی در حد دهم اهم تا چند اهم است. بنابر این در اکثر مدارها -چون مقدار مقاومت‌های شبکه به مراتب بیش از این است- می توان از R_f صرفنظر کرد ($R_f \approx 0$). بنابراین در چنین حالتی مدل دیود توسط رابطه (٤–۲۳) به عبارت دیگر شکل ٤–۲۰ تعریف می‌شود.



شکل ٤–۲۰ مدل ساده تر دیود

$$\begin{cases} i_D = 0 & for \quad v_D < V_d \\ v_D = V_d & for \quad i_D > 0 \end{cases} \qquad (٢٣–٤)$$

مدل فوق در بسیاری از مدارهای واقعی -برای علایم بزرگ- قابل استفاده است. بعضی وقت‌ها، یعنی در صورتی که افت پتانسیل بر روی سایر عناصر شبکه، خیلی بزرگ‌تر از ولتاژ آستانه باشد، مدل باز هم ساده‌تر می‌شود. در این صورت میتوان از ولتاژ آستانه در مقابل سایر ولتاژها صرفنظر کرد، یعنی $V_d \approx 0$. در این صورت مدل دیود توسط رابطه (٤–۲٤) به عبارت دیگر شکل ٤–۲۱ تعریف می‌شود؛ که به این مدل، مدلِ ایده‌آلِ علایمِ بزرگِ دیود گویند. در این درس تقریباً همیشه از این مدل استفاده می شود.



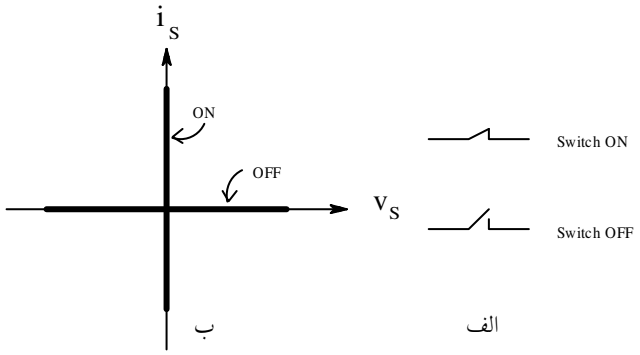
شکل ٤-٢١ مدل ایده‌آل دیود

$$\begin{cases} i_D = 0 & for \quad v_D \le 0 \\ v_D = 0 & for \quad i_D \ge 0 \end{cases} \qquad (٢٤-٤)$$

این مدل معادل است با قسمتی از مدل یک سویچ. زیرا بنا به تعریف، یک سویچ یک دو قطبی است که دارای دو حالت میباشد:

- **سویچ قطع است:** جریان گذرنده از سویچ ایده‌آل صفر بوده، ولتاژ دو سر آن توسط سایر عناصر مدار مشخص می‌شود
- **سویچ وصل است:** افت پتانسیل دو سر سویچ ایده‌آل صفر بوده، جریان گذرنده از آن توسط سایر عناصر مدار مشخص می‌شود.

شکل ٤-٢٢ نماد و مشخصه یک سویچ ایده‌آل و رابطه (٤-٢٥) مدل ریاضی آن را نمایش می‌دهد.

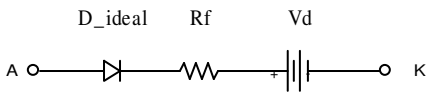


شکل ٤-٢٢ مدل سویچ ایده‌آل الف- نماد، ب- مشخصه

$$\begin{cases} i_D = 0 & Switch \quad OFF \\ v_D = 0 & Switch \quad ON \end{cases} \qquad (٢٥-٤)$$

با توجه به مطالب فوق می‌توان یک مدل مداری مطابق شکل ٤-٢٣ برای دیود در نظر گرفت.

بنابراین به ازای $V_{AK} \le 0$ دیود مانند یک مدار باز عمل می



شکل ٤-٢٣ مدل مداری ساده شده دیود

کند. به ازای $V_{AK} > 0$ دیود مانند یک منبع ولتاژ (۰,۷ ولتی) سری با یک مقاومت عمل می کند (نمودار شکل ٤-١٩). چنان که از اثر مقاومت به عبارت دیگر منبع بتوان صرفنظر کرد، مدار معادل شکل های ٤-٢٠ و ٤-٢١ حاصل میشود.

بنابراین در بیشتر مواقع یک دیود در جهت مستقیم را مانند یک سویچ بسته[1] و در جهت معکوس را مثل یک سویچ باز[2] در نظر می‌گیرند.

[1] وصل، ON

[2] قطع، OFF

٤-٦ کار برد دیود

در این بخش به تعدادی از کار بردهای دیود اشاره می شود. طبیعتاً کار بردهای دیود بـه مراتـب بـیش از مثال هایی است که در این جا ذکر می شوند. همان طور که برای دیود دو مدل علایم کوچک و علایم بزرگ را بررسی کردیم، کار بردهای دیود را نیز در دو گروه مربوطه بررسی می کنیم.

٤-٦-١ کار برد علایم کوچک دیود

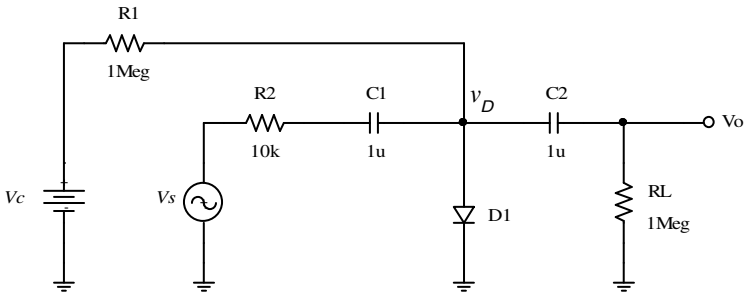
همان‌طور که در بخش ٤-٥-١ مشاهده شد، در صورت بایاس کردن دیود حول یک نقطه کـار و اعمـال یک سیگنال با دامنه کم به آن، می‌توان دیود را مانند یک مقاومت خطی در نظر گرفت. باتغییر جریـان نقطـه کار مقدار مقاومت تغییر می‌کند؛ لذا می‌توان مهمترین کاربرد علایم کوچک دیود را، استفاده از آن بـه عنـوان یک پتانسیومتر الکترونیکی دانست.

مثال ٤-٢ برای مدار شکل ٤- ٢٤، $v_o(t)$ را با فرض ایـن کـه منبـع سـیگنال یـک مولـد سینوسـی بـا $f = 10kHz$ ، $V_P = 20mV$ و برای دیود $n.V_T = 25mV$ باشد، برای دو حالت:

الف- $V_C = 10V$ و

ب- $V_C = 100V$

بدست آورید.



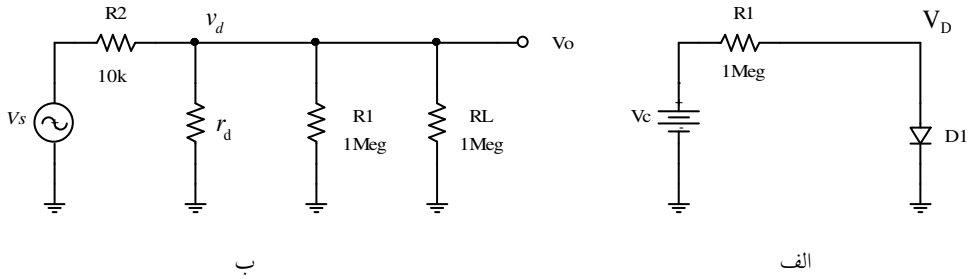
شکل ٤-٢٤ مدار مثال ٤-٢

حل: مدار از دو دید بررسـی می شود:

١- V_C و $R1$ دیود را در نقطه کار بایاس می کنند. برای DC، خازنها باز بوده، سایر المانهـا نقشی در تنظیم نقطه کار ندارند.

۲- از دید AC، فقط یک منبع سیگنال ($v_s(t)$) با فرکانس $10kHz$ در مدار وجود دارد. چون $\tau_1 \approx R_1 C_1 = 10ms$ و $\tau_2 \approx R_L C_2 = 1s$ نسبت به $T = \frac{1}{f} = 100\mu s$ خیلی بزرگ است، میتوان برای سیگنال - در حالت پایدار - خازنها را اتصال کوتاه فرض نمود.

بنابراین مدار شکل ٤-٢٤ را می توان بصورت شکل ٤-٢٥ به دو مدار تجزیه کرد:



ب الف

شکل ٤-٢٥ الف- مدار معادل برای محاسبه نقطه کار ب- مدار معادل برای محاسبه سیگنال

۱- بایاسینگ مدار:

$$V_D \approx 0.7V, \qquad I_D = \frac{V_C - V_D}{R1}, \qquad V_C >> V_D \Rightarrow I_D \approx \frac{V_C}{R1}$$

۲- محاسبه سیگنال خروجی:

با فرض این که مدار در ناحیه خطی باشد (تغییرات ولتاژ دیود کمتر از ده میلی ولت) و

$$v_o \approx \frac{r_d}{r_d + R2} \cdot v_s \qquad : r_d << R1 \| RL$$

بنابراین برای حالت الف:

$$V_C = 10V \;\Rightarrow\; I_D \approx \frac{10V}{1M\Omega} = 10\mu A \;\Rightarrow\; r_d = \frac{25mV}{I_D} = 2.5k\Omega$$

$$v_o = \frac{r_d}{r_d + R2} \cdot v_s = \frac{2.5k\Omega}{2.5k\Omega + 10k\Omega} \cdot V_P Sin(\omega t) = 4mV \cdot Sin(\omega t)$$

برای حالت ب:

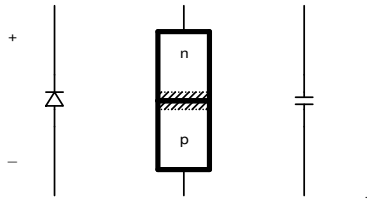
$$V_C = 100V \;\Rightarrow\; I_D \approx \frac{100V}{1M\Omega} = 100\mu A \;\Rightarrow\; r_d = \frac{25mV}{100\mu A} = 250\Omega$$

$$v_o = \frac{r_d}{r_d + R2} \cdot v_s = \frac{250\Omega}{250\Omega + 10k\Omega} \cdot V_P Sin(\omega t) \approx 0.5mV \cdot Sin(\omega t)$$

بنابراین هر دو فرض درست هستند. زیرا هم دامنه ولتاژ سیگنال دیود در دو حالت (٤ و ٠/٥ میلی ولت) از ١٠ میلی ولت کمتر است و هم r_d ($2.5k\Omega$ بعبارت دیگر 250Ω) خیلی از $R2 \parallel R1 = 500k\Omega$ کوچکتر می‌باشد.

تذکر: چنان که مشاهده میشود، با تغییر V_C بعبارت دیگر I_D، دامنه سیگنال خروجی قابل تنظیم است. بنابراین این مدار را می‌توان بعنوان یک پتانسیومتر (تضعیف کننده) الکترونیکی به کار برد.

یکی دیگر از کار بردهای علایم کوچک دیود، استفاده از آن به عنوان خازن قابل تنظیم است. اگر یک دیود را در جهت معکوس بایاس کنیم، در محل اتصال دو نیمه هادی[1] تقریباً عایق خواهد بود. از آن جایی که هر کدام از خود نیمه هادیها رسانای نسبتاً خوبی هستند[2]، ترکیب هادی – عایق – هادی خواهیم داشت (شکل ٤-٢٦). در نتیجه این المان مانند یک خازن عمل خواهد کرد.



شکل ٤-٢٦ نحوه تشکیل خازن یک دیود در بایاس

عرض ناحیه عایق که به آن لایه تهی[3] گویند به عبارت دیگر فاصله هادی‌ها از یک‌دیگر، با افزایش ولتاژ معکوس دیود بیشتر خواهد شد. این امر باعث کاهش ظرفیت خازنی دیود می‌گردد (چرا؟). بنابراین می‌توان با تغییر ولتاژ نقطه کار ظرفیت خازن را عوض کرد (خازن قابل تنظیم). از این خاصیت در رادیو و تلویزیون برای انتخاب کانال مطلوب استفاده می‌شود.

[1] ر. ک. به فصل ٤-٢-٣ و درس فیزیک الکترونیک

[2] ایضاً

[3] Depletion-Layer