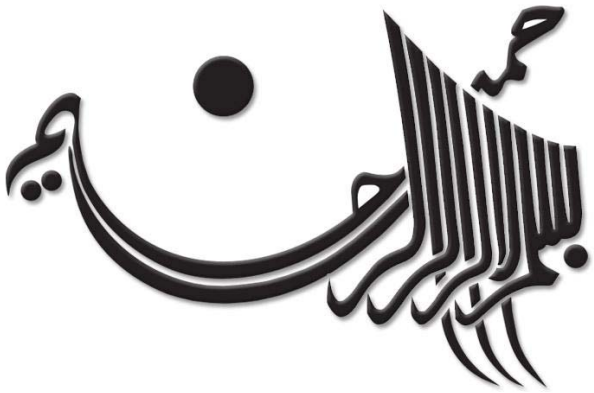


WWW.ESUD83.MIHANBLOG.COM

موضوع :دیود تونلی و تونل زنی کوانتمی

ارائه دهنده :مجتبی اخوان صباغ

سمینار فیزیک الکترونیک

مقدمه ای برای مکانیک کوانتومی

هروقت علم در جایی به بنبست برخورد کرده و نتوانسته پدیده ها را با علمی که دارد توجیه کند علم کاملتر و دقیقتر شده، مکانیک کوانتمی هم دقیقاً در زمانی که مکانیک کلاسیک نتوانست بعضی از پدیده های طبیعی را توجیه کند شکل گرفت و در واقع مکانیک را کاملتر و جامعتر کرد.

مکانیک کلاسیک در مورد چرایی و چگونگی حرکت اجسامی به جرم وحجمی که برای بشر قابل درک و رؤیت است ، می پردازد. وقتی بشر به حدی از تکامل علمی رسید که به بررسی حرکت ذرات ریزی مثل الکترون و پروتون و فوتون و . . . پرداخت به تناقضی فاحش بین تجربه و نظریه مکانیک کلاسیک برخورد و بر آن شد تا با اصلاح کردن و فرضیات مناسب در جنبه نظری هم به نتایج تجربی دست پیدا کند تا بتواند به پیشگویی پدیده ها بپردازد. بر این اساس مکانیک کوانتوم قدیم بیان شد که با پذیرفتن سینماتیک و اصلاح دینامیک مکانیک کلاسیک توانست برخی از پدیده ها مثل گسسته بودن طیفهای تابشی اتمها و اثر فوتوالکتریک و اثر کامپتون و توجیه جسم سیاه بپردازد ولی این نظریه ایرادهایی داشت ، از جمله آنها : منسجم نبود و در مدارهای باز حرفی برای گفتن نداشت و آهنگ گذار را پیشگویی نمی کرد و . . . به همین دلیل عمر زیادی نداشت و جای خود را به مکانیک کوانتوم جدید داد.

همانطور که می دانیم در توجیه پدیده فوتوالکتریک انیشتن با در نظر گرفتن نور بصورت بسته های انرژی یا ذراتی بنام فوتون توانست جایزه نوبل را دریافت کند. در واقع نور خاصیت دوگانه ای دارد ، در برخی از آزمایشات مثل دوشکاف یانگ فقط با در نظر گرفتن حالت موجی نور مطابقت دارد و با ذره ای بودن نور در تناقض است و در برخی دیگر از پدیده ها مثل فوتوالکتریک نور باید ذره ای در نظر گرفته شود تا این پدیده توجیه شود و با موجی بودن نور در تناقض است.

نور واقعا موج الکترومغناطیس است یا ذره؟؟؟

مکانیک کوانتوم جواب این سوال را به خوبی می دهد. در واقع بین این دو خاصیت یک ارتباطی برقرار می کند و بیان می نماید که نور به هیچ وجه نه موج کلاسیک است ونه ذره کلاسیک .

تعریف ذره کلاسیک: ذره ای که ما با دانستن مکان و سرعت اولیه و با آگاهی داشتن از نیروهایی که بر آن وارد میشود می توانیم مکان و سرعتش را در لحظات بعدی بدانیم(قانون دوم نیوتن)

موج کلاسیک: موج در واقع انرژی را منتقل می کند و در فضا پخش می شود ، مثل امواج صوتی که انرژی آنها با مجذور دامنه رابطه دارد روی محیط یک کره که در حال بزرگتر شدن است تقسیم میشود تا جایی که در اثر زیاد شدن محیط کره و ثابت ماندن انرژی صوتی صدا ضعیفتر شده تا دیگر قابل درک نیست .

فوتون ذره کلاسیکی نیست چون ما اصلا نمی توانیم مسیر آنرا مشخص کنیم و موج کلاسیکی نیست چون توسط آزمایشاتی مشخص شده که انرژی نور پخش نمی شود.

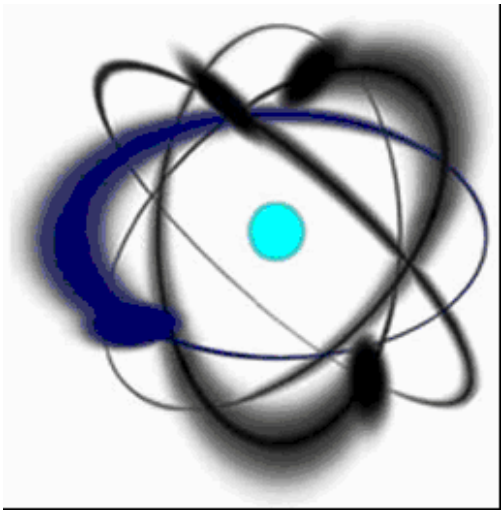
ارتباطی که مکانیک کوانتوم بین ذرات غیر کلاسیکی و امواج غیر کلاسیکی برقرار کرده که البته با واقعیت همخوانی دارد به این گونه است که مجذور دامنه امواج غیر کلاسیکی در واقع احتمال حضور ذرات غیر کلاسیکی را بیان می کند یعنی در جایی که شدت بیشتر است (شدت با مجذور دامنه رابطه مستقیم دارد) اگر تعداد زیادی ذرات غیر کلاسیکی داشته باشیم (در همه آزمایشات ما با تعداد زیادی از این ذرات سرو کار داریم) تعداد بیشتری از این ذرات به آن نقطه برخورد می کنند و در جایی که شدت صفر است احتمال حضور ذرات در آنجا صفر است یعنی هیچ ذره ای به آن نقطه برخورد نمی کند.

مکانیک کوانتوم فقط با احتمالات سرو کار دارد و بیشترین اطلاعاتی که در کوانتوم ما می توانیم بدست آوریم احتمال حالتهای مختلف است.

ذرات غیر کلاسیکی موجودات عجیبی نیستند بلکه فقط ذراتی هستند که جرم بسیار بسیار کمی دارند مرتبه جرم آنها $۱۰^{-۳۰}$ کیلوگرم است . در تمام فرمولهای مکانیک کوانتوم اگر جرم را درحد اجسام قابل لمس برای انسان مثل توپ یا جعبه یا . . . بگذاریم همان نتایج مکانیک کلاسیک بدست می آید. این نشان دهنده کاملتر و جامعتر بودن فیزیک کوانتوم است.

آقای دوبروی بر اساس تقارنی که در طبیعت وجود دارد حدس زد که چون امواج مثل نور خاصیت ذره ای دارند حتما ذره ها هم خاصیت موجی دارند و ارتباط بین این دو خاصیت را به این صورت بیان کرد که اندازه حرکت ذره با عکس طول موج و انرژی ذره با بسامد موج رابطه دارد. وجود این امواج توسط دیویسون و گرمر بصورت تجربی اثبات شد و از طرفی وقتی یک باریکه ای از الکترونها را به بلور نیکل می تابانیم پدیده پراش رخ میدهد که پراش

خاصیت امواج است پس ذرات هم خاصیت موجی دارند و به امواجی که به ذرات نسبت داده می شود امواج مادی می گویند که مجذور دامنه آنها همان احتمال حضور را به ما می دهد.
بحث مکانیک کوانتوم بسیار فراتر و شیرین است و من فقط با این مقدمه خواستم علاقه مندان را ترغیب به مطالعه در این زمینه کنم مباحث بسیار جالبی در مکانیک کوانتوم است مثلاً ما هیچ وقت نمی توانیم سرعت و مکان ذره را همزمان اندازه گیری کنیم یا میتوانیم بفهمیم که چرا هر چه دما پایین می آید انرژی جنبشی صفر نمیشود یا با پدیده تونل زنی و خیلی مباحث متنوع دیگری می توانیم آشنا شویم .
دو اتم هنگامی که کاملاً از یکدیگر جدا شوند، بطوری که هیچگونه برهمکنش توابع موج وجود نداشته باشد، می‌توانند دارای ساختاری مشابه ساختار الکترونی باشند. با کوچک شدن فاصله بین دو اتم ، توابع موج الکترونی شروع به همپوشانی می‌کنند. بنا به اصل طرد پائولی در یک سیستم با برهمکنش معین هیچ دو الکترونی نمی‌توانند دارای حالت کوانتومی یکسان باشند. پس باید ترازهای انرژی مجزا از اتم‌های منفرد به ترازهای جدید متعلق به هر دو اتم و نه یکی آنها تقسیم شوند .

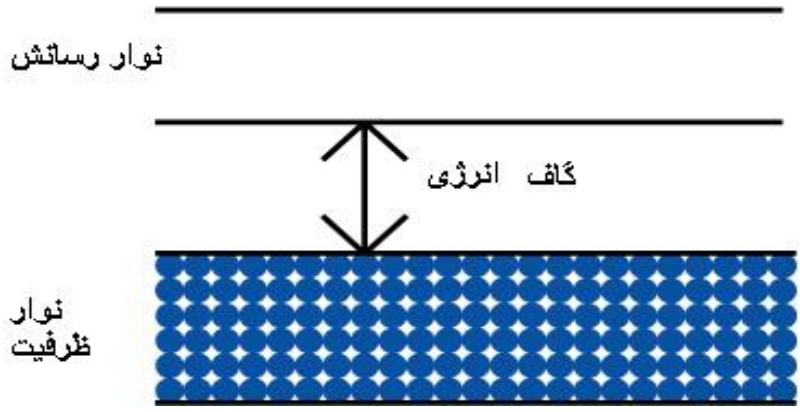


جایگاه الکترون در اتم

الکترونها در جامدات به انرژیهای معینی محدود شده و مجاز به قرار گرفتن در انرژیهای دیگر نیستند. تفاوت اساسی بین الکترون در یک جامد با الکترون در یک اتم جدا شده ، این است که در جامد الکترون دارای یک گستره یا تراز از انرژی‌های قابل دسترس است. زیرا در جامد توابع موج الکترونی اتم‌های همسایه همپوشانی داشته و یک الکترون در یک اتم خاص قرار ندارد. طبیعتا این تاثیر بر انرژی پتانسیل و شرایط مرزی در معادله موج اثر می‌گذارد و سبب می‌شود، انرژیهای مختلفی بدست آورده و دو نوع تراز انرژی به نام تراز ظرفیت و هدایت داشته باشیم، که توسط انرژی شکاف یا باند همسویی از یکدیگر جدا شده‌اند .

نوار انرژی شبکه اتمی

در شبکه اتمی هر الکترون می‌تواند فقط در سطوح انرژی باشد، و در ناحیه ممنوعه(ناحیه‌ای که ما بین تراز ظرفیت و تراز هدایت است) هیچ الکترونی یافت نمی‌شود. یونیزاسیون مکانیسمی است که در آن الکترون می‌تواند پس از کسب انرژی کافی ، از اتم خود جدا شده و در تراز هدایت به الکترونهای آزاد بپیوندد.



نوارهای انرژی نیم رسانا

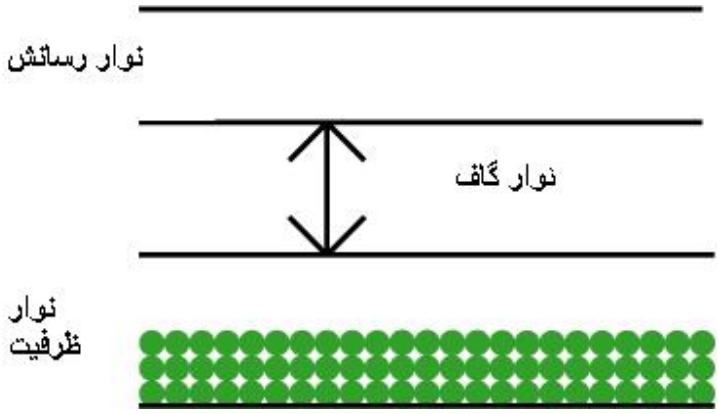
نوارهای انرژی عایق

در مواد عایق گاف انرژی بین نوار ظرفیت و نوار هدایت حدود ٥ الکترون ولت یا بیشتر است، و این شکاف عظیم قادر خواهد بود به میزان قابل توجهی از حضور الکترون در تراز هدایت ، در دمای اتاق جلوگیری کند .

نوارهای انرژی نیم رسانا

در اجسام نیم رسانا شکاف انرژی برای سیلسیوم ١,١ الکترون ولت و برای ژرمانیوم ٠,٦٧ الکترون ولت می‌باشد، یعنی یک الکترون و نوار ظرفیت قادر خواهد بود با کسب این مقدار

انرژی باند ظرفیت را ترک نموده ، با طی نمودن گاف انرژی خود را به تراز هدایت یا رسانش رسانده و به عنوان الکترون آزاد برای برقراری جریان الکتریکی موثر باشد.



گاف انرژی در رسانا

نوارهای انرژی رسانا

برای اجسام رسانا بین تراز ظرفیت و تراز هدایت شکافی وجود ندارد، و این ترازها روی هم منطبق شده و دارای باند مشترک می‌باشند. یعنی یک رسانا حتی در صفر درجه کلوین نیز دارای الکترون در باند هدایت است. بنابراین در دمای اتاق تعداد الکترونهای آزاد برای برقراری جریان یا حرکت بارها بیش از حد مورد نیاز موجود می‌باشد .

تراز فرمی

الکترونها در جامدات از توزیع آماری فرمی – دیراک پیروی می‌کنند که نمونه‌هایی دیگر از این نوع توابع آماری توزیع ماکسون بولتزمن برای ذرات کلاسیک (مانند گاز) و بوز انیشتین برای فوتونها است. در موقع توسعه این نوع آمار غیر قابل تشخیص بودن الکترونها ، طبیعت موجی آنها و اصل انحصار پائولی باید در نظر گرفته شود .تابع توزیع فرمی دیراک احتمال اشغال یک

تراز انرژی توسط الکترونها در دمای T را بیان می کند و کمیت E_F یعنی تراز فرمی که بطور نمایی در مخرج تابع احتمال فرمی ظاهر می‌شود در تحلیل رفتار نیمه رسانا از اهمیت زیادی برخوردار است.

تابع احتمال

بررسی تابع احتمال نشان می‌دهد که این توزیع دارای شکل مستطیلی به ازای T=0 (دما) است. یعنی در دمای T=0 (کلوین) احتمال اشغال ترازهای انرژی توسط الکترون که از لحاظ انرژی پائین‌تر از انرژی فرمی هستند ، برابر یک است. در صورتی که احتمال اشغال ترازهای انرژی توسط الکترون که از لحاظ انرژی پائین تر از انرژی فرمی‌اند برابر صفر است. اگر دما مخالف صفر کلوین باشد.

در ضمن اینکه احتمال اشغال حالتهایی با انرژی کمتر از انرژی فرمی کاهش می‌یابد بر احتمال اشغال حالت‌هایی با انرژی بیشتر از انرژی فرمی افزوده می‌شود و دما هر چه قدر افزایش یابد این روند ادامه می‌یابد. تقارن موجود در توزیع حالتهای پر و خالی در اطراف تراز فرمی ، این تراز را یک نقطه مرجع طبیعی در محاسبات مربوط به تراکم الکترونها و حفره‌ها در نیمه رساناها نموده است .

تراز فرمی در نیمه رساناها

- **تراز فرمی در ماده ذاتی** : ماده ذاتی ، ماده‌ای است که در آن تزریق باربر صورت نگرفته است و تراکم الکترونها در نوار هدایت با تراکم حفره‌ها در باند ظرفیت یکسان است و تراز فرمی باید در نقطه‌ای قرار بگیرید که حول آن تقارن تراکم باربرها وجود داشته باشد. لذا وسط فاصله بین دو باند هدایت و ظرفیت محل قرار گیری تراز فرمی است. که بر تراز ذاتی نیمه رساناها E_i منطبق شده است.
- **تراز فرمی در ماده نوع p** : چون ماده نوع p در اثر تزریق اتمهای پذیرنده بوجود آمده‌اند در این مواد کمبود الکترون وجود دارد در عوض تعداد حفره‌ها زیاد بوده و

حاملهای اکثریت‌اند و برای برقراری تقارن در تراکم باربرها تراز فرمی باید نزدیک باند ظرفیت که تراکم حفره‌ها در آن زیاد است قرار گیرد .

شکل تابع توزیع فرمی $f(E)=1/1+e^{(E-E_F)/KT}$

در دمای معمولی K T حدود ۰,۰۲۶ الکترون ولت است. معمولا از ۱ در مقابل تابع نمایی صرفنظر می کنند .

احتمال اشغال یک حالت انرژی در تراز فرمی

وقتی که یک حالت انرژی در تراز فرمی منطبق شود در واقع $E=E_F$ است که با استفاده از تابع توزیع **f(E)** بدست می‌آید که در چنین حالتی احتمال اشغال یک حالت انرژی در تراز فرمی بوسیله الکترونها برابر $\frac{1}{2}$ است.

ذره گرفتار در چاه :

ذره ای را مثل الکترون در نظر بگیرید که در اثر نیرو های خارجی در محدوده ای از فضا مقید شده است ، یک اتم برای الکترون چنین حالتی را بوجود می آورد .

این حالت را به شکل نمودار $U-x$ این چنین نشان می دهند که در فاصله X>0 در تکنولوژی های جدید امکان ایجاد " ساختارهای چاه کوانتومی " جامدی را با دقت یک لایه اتمی می دهد که چنین ساختارهایی در موارد عملی متعددی نظیر قطعات مخابرات نوری و دریچه های منطقی نوری بکار می روند .

زمانی که ذره به لبه های این چاه نزدیک می شود نیرویی در جهت عکس بر اساس این رابطه به آن وارد می شود $F=-\frac{dU}{dx}$ ، طبق مکانیک کلاسیک اگرانرژی ذره از U (ارتفاع چاه یا مقدار انرژی که برای آزاد شدن از این قید نیاز است) بیشتر باشد ، می تواند از چاه بیرون بیاید ، ولی در نظریه کوانتومی این احتمال وجود دارد که تعدادکمی از الکترون ها بتوانند از این چاه بیرون بیایند .

خوب حالا معنی این چی هست ، به این معنی است که اگر شما خودنویسی را که دوستتان بهتان هدیه داده در جعبه ای قرار دهید که گم نشود ، طبق نظریه کلاسیک تا کسی یا نیرویی آن را از جعبه بیرون نیاورد شما آن را بیرون جعبه نخواهید دید ولی در نظریه کوانتومی بر اساس پدیده تونل زنی و عدم قطعیت هایزنبرگ احتمالی هر چند کم وجود دارد که شما خودنویس را در بیرون جعبه ببینید .

پدیده تونل زنی :

می خواهیم در مورد پدیده کوانتومی نفوذ در سدی که از نظر کلاسیکی نفوذ ناپذیر است صحبت کنیم.

یک سد پتانسیلی را در دو بعد تصور کنید ، به این صورت که در دامنه $L > 0$ احتمال معینی هست که الکترون بتواند به سد نفوذ کند و حرکتش را ادامه دهد .

مثال خودنویس هم اینجا مطرحه ، ولی برعکس ، یعنی اینبار خودنویس در بیرون جعبه قرار دارد و احتمال وجود خودنویس در درون جعبه مورد بررسی قرار می گیرد .

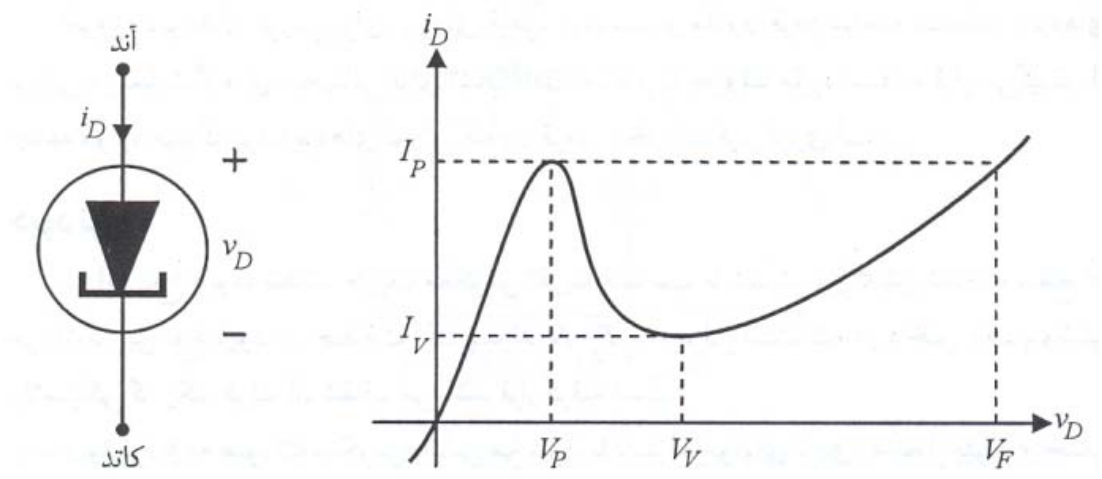
حالا اینکه این احتمال چقدر است و به چه چیزهایی بستگی دارد در زیر گفته شده است .

مقدار ضریب عبور به شدت به پهنای سد ، یعنی مقدار L ، و جرم ذره و ارتفاع سد (یا همان U) بستگی دارد . هر چه مقدار L و U بیشتر شود ، ضریب عبور کم می شود و از طرف دیگه ، با افزایش جرم ذره ضریب عبور کوچکتر می شود ، بطوری که با تغییر حالت از الکترون به خودنویس این احتمال کمتر و کمتر می شود .

دیود تونلی

تفاوت اساسی ساختمان دیود تونلی با دیود های معمولی در چگالی بسیار بالای ناخالصی در نیمه هادی های نوع N و P به کار رفته در آن است. در این نوع دیود چگالی ناخالصی ممکن است از $10^{19}\ cm^{-3}$ نیز تجاوز مایل. همانطور که می دانیم عرض ناحیه تهی با چگالی ناخاصی ها نسبت عکس دارد.بنابر این در دیود تونلی عرض ناحیه تهی بسیار کم بوده و در حدود ۰,۰۱ دیودهای معمولی می باشد. این دیود در ولتاژهای معکوس و در ولتاژهای مستقیم کوچک دارای

مقاومت بسیار کوچکی است. از ویژگی های بارز دیود تونلی داشتن مقاومت منفی در بخشی از مشخصه اش می باشد.



با نگاهی به شکل در می یابیم که در ولتاژهای بین V_V , V_P مشخصه دارای مقاومت منفی است $\left(\frac{dV_D}{di_D}<0\right)$. از این ویژگی دیود تونلی در طراحی نوسانسازهای فرکانس بالا استفاده می شود.

وقتی که دیودهای تونلی برای اولین بار بعد از دهه ۱۹۵۰ ظاهر شدند ، گمان می رفت که راه حل بسیاری از مسائل مدار باشد. به علت اینکه آنها سریع بودند ، برای مثال فرض بر این بود که انقلاب کامپیوتری خواهد شد. متأسفانه آنها ادوات مشکلی برای استفاده هستند. این واقعیت و نیز پیدایش ترانزیستور به همراه توانایی های خیره کننده آنها ، دیود تونلی را تقریباً بدون استفاده گذارد .

عملکرد دیود تونلی

دیود تونلی که شامل پیوند p-n است، در حالت تعادل تراز فرمی ، در سراسر آن ثابت است. (E_{fp}در زیر لبه نوار ظرفیت طرف P قرار دارد و E_{fn} بالای لبه نوار هدایت در طرف n واقع است). نوارها در مقیاس انرژی ، همپوشانی کرده‌اند تا E_f (انرژی فرمی) ثابت بماند. مفهوم آن اینست که با اندکی گرایش مستقیم یا معکوس وضعیتهای پر و خالی در مقابل هم قرار می‌گیرند که فاصله بین آنها اساساً پهنای ناحیه تهی است .

دیود تونلی تحت گرایش معکوس

تحت یک گرایش معکوس این امکان فراهم می‌شود که الکترونها از حالت پر نوار ظرفیت در زیر E_{fp} به حالتهای خالی نوار هدایت در بالای E_{fn} تونل بزنند. این شرایط مشابه اثر زنری است، با این تفاوت که هیچگونه گرایشی برای ایجاد حالت همپوشانی نوارها لازم نیست .با ادامه افزایش گرایش معکوس E_{fn} به پایین آمدن خود در مقیاس انرژی نسبت به E_{fp} ادامه داده و حالتهای پر بیشتری را از طرف p مقابل حالتهای خالی طرف n قرار می‌دهد. در نتیجه تونل زنی الکترونها از P به n با افزایش گرایش معکوس زیاد می‌شود .

دیود تونلی تحت گرایش مستقیم

وقتی یک گرایش مستقیم اعمال شود، E_{fn} نسبت به E_{fp} به اندازه qv در مقیاس انرژی افزایش می‌یابد. در نتیجه الکترونها زیر E_{fn} در طرف n در مقابل وضعیتهای خالی بالای E_{fp} در طرف Pقرار می‌گیرند. این جریان مستقیم با افزایش گرایش مادامی که حالتهای پر بیشتری در مقابل حالتهای خالی قرار می‌گیرند، افزایش می‌یابد .

مقاومت فعال

در دیودهای تونلی با گرایش مستقیم ، هنگامی که E_{fn} به افزایش خود نسبت به E_{fp} ادامه می‌دهد، به نقطه‌ای می‌رسیم که در آن نوارها از مقابل هم می‌گذرند. در این حالت تعداد حالتهای پر در مقابل حالتهای خالی کاهش می‌یابد. این ناحیه از این جهت اهمیت دارد که کاهش جریان

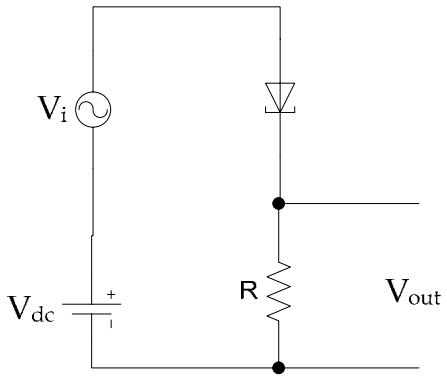
تونل زنی با افزایش گرایش ناحیه‌ای با شیب منفی تولید می‌کند .مقاومت فعال (دینامیک) dv/di منفی است. این ناحیه با مقاومت منفی در بسیاری از کاربردها مفید است. اگر گرایش مستقیم بعد از ناحیه با مقاومت منفی افزایش یابد، جریان دوباره شروع به افزایش می‌کند .

کاربردهای مداری

مقاومت منفی دیود تونلی را می‌توان برای کلید زنی ، نوسان ، تقویت و سایر عملیات مداری مورد استفاده قرار داد. این حوزه وسیع کاربردی همراه با این واقعیت که فرایند تونل زنی تأخیر زمانی رانش و نفوذ را ندارد، دیود تونلی را یک انتخاب طبیعی برای مدارهای بسیار سریع ساخته است. از مزایای دیود تونلی می توان قیمت ارزان ، اغتشاش کم ، سرعت زیاد ، و توان مصرفی کم آن نام برد .

یک کاربرد دیود تونلی

یک مقسم ولتاژ با یک مقاومت و یک دیود تونلی می تواند واقعاً یک تقویت کننده باشد .



برای یک ولتاژ v_{in} معادله مقسم ولتاژ می شود :

$$v_{out} = \frac{R}{R + r_d} v_{in}$$

r_d مقاومت دینامیک دیود تونلی در نقطه کار است و V_{dc} ولتاژ dc تأمین کننده جریان بایاس در نقطه کار دیود است.

اگر نقطه کار در فاصله بین V_p و V_V بگونه ای تنظیم شود که $r_d = \frac{dv_D}{di_D} \approx -R$ گردد مخرج رابطه تنظیم ولتاژ بسیار کوچک خواهد شد در خروجی تقویت کنندگی خواهیم داشت .

WWW.ESUD83.MIHANBLOG.COM

email : aminnima2@gmail.com