

فصل: مبانی نانوالکترونیک و فیزیک حالت جامد

بخش ۴: آشنایی با ساختار و عملکرد ترانزیستورها

مقدمه

پس از آشنایی مقدماتی با مفاهیم بیان شده در بخش‌های قبل، اکنون می‌توانیم درباره‌ی مهم‌ترین عنصر مدارات الکترونیکی یعنی ترانزیستور صحبت کنیم. اهمیت ترانزیستور در مدارات الکترونیکی همانند اهمیت آجر در ساختن یک ساختمان است! به بیان دیگر، همان‌طور که آجر جزء اساسی در ساختن یک ساختمان است، ترانزیستور نیز جزء اصلی ساختن یک مدار الکترونیکی است.

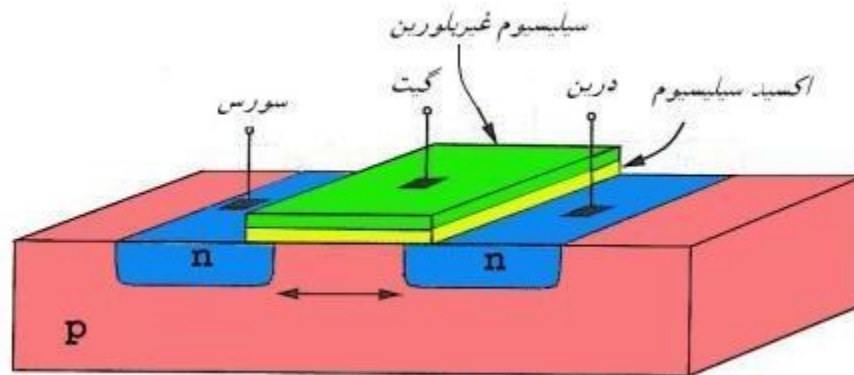
ترانزیستور دارای انواع گوناگونی است که مهم‌ترین آن ترانزیستور اتصال دوقطبی (BJT) و ترانزیستور اثر میدانی نیمه رسانا اکسید فلزی (MOSFET) نام دارد. ما در این بخش درباره‌ی ساختار و چگونگی عملکرد MOSFET مطالبی را خواهیم آموخت. کاربرد MOSFET در مدارهای الکترونیکی امروزی بسیار بیشتر از BJT است، بنابراین فعلاً سراغ MOSFET می‌رویم. برای اختصار این نوع ترانزیستور را، ترانزیستور MOS می‌نامیم.

۱- ساختار ترانزیستور MOS

ترانزیستور MOS دارای دو نوع گوناگون است. یکی NMOS و دیگری PMOS نام دارد. در ترانزیستور NMOS الکترون‌های آزاد حامل بار الکتریکی هستند و در ترانزیستور PMOS حفره‌های آزاد حامل بار الکتریکی می‌باشند. ابتدا ساختار ترانزیستور NMOS را شرح می‌دهیم. سپس با استفاده از تشابهات موجود، ساختار ترانزیستور PMOS را نیز بیان می‌کنیم.

در شکل ۱ ساختار یک ترانزیستور NMOS را مشاهده می‌کنیم. همان‌طور که در شکل ۱ می‌بینیم ترانزیستور NMOS از سه ناحیه تشکیل شده است. هر سه ناحیه بر روی یک بدنه بنا شده است. در ترانزیستور NMOS، بدنه از جنس نیمه‌رسانای نوع p است. بر روی بدنه قطعه‌ای قرار گرفته که شامل دو ناحیه‌ی

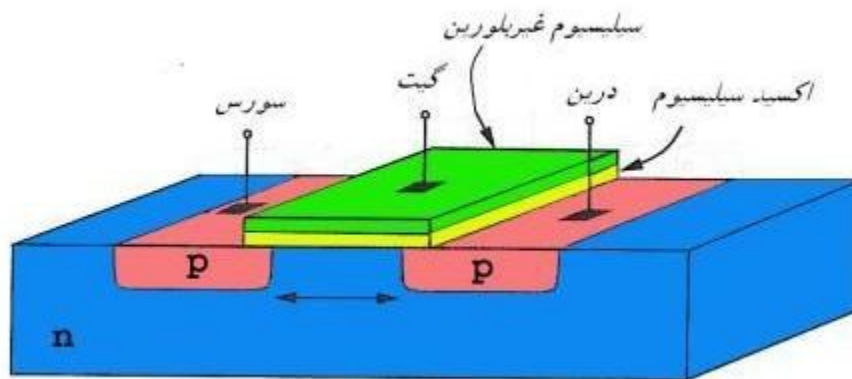
نیمه‌رسانای نوع n است. این ناحیه‌ها با فاصله‌ی معینی از یکدیگر قرار گرفته‌اند و بین آنها، نیمه‌رسانای نوع p قرار دارد.



شکل ۱: ساختار یک ترانزیستور NMOS

جنس ترانزیستور NMOS، مانند بسیاری از قطعات الکترونیکی دیگر، از عنصر سیلیسیوم (Si) است که با افزودن ناخالصی از عناصر سه ظرفیتی و پنج ظرفیتی به ترتیب به نیمه رسانای نوع p و نوع n آلاینده می‌شود. بر روی نیمه‌رسانای نوع p که در بین دو ناحیه‌ی n قرار دارد، یک لایه‌ی نازک از اکسید سیلیسیوم (SiO_2) قرار گرفته که ماده‌ای نارسانا است. یک لایه‌ی رسانا (که در گذشته از جنس فلز بوده و در فناوری جدید از جنس سیلیسیوم غیربلورین است) نیز بر روی لایه‌ی نازک اکسید قرار دارد.

بدنه‌ی ترانزیستور NMOS را زیربنا یا بدنه می‌نامیم. یکی از ناحیه‌های نیمه‌رسانای نوع n را درین (Drain) و دیگری را سورس (Source) می‌گوییم. لایه‌ی رسانای روی اکسید را هم گیت (Gate) می‌نامیم. در شکل ۲ یک ترانزیستور PMOS را مشاهده می‌کنیم. همان‌طور که در شکل ۲ می‌بینیم ترانزیستور PMOS بر روی زیربنایی از جنس نیمه‌رسانای نوع n، بنا شده است. ترانزیستور PMOS از دو ناحیه‌ی نیمه‌رسانای نوع p تشکیل شده که با فاصله‌ی معینی از یکدیگر قرار دارند. این دو ناحیه را درین و سورس می‌نامیم. در بین دو ناحیه‌ی درین و سورس، ناحیه‌ای از جنس نیمه‌رسانای نوع n قرار دارد. مشابه ترانزیستور NMOS، در ترانزیستور PMOS نیز بر روی ناحیه‌ی بین سورس و درین، یک لایه‌ی نازک از اکسید سیلیسیوم قرار دارد. بر روی این لایه‌ی اکسید، یک لایه‌ی رسانا از جنس سیلیسیوم غیربلورین وجود دارد که آن را گیت می‌نامیم.

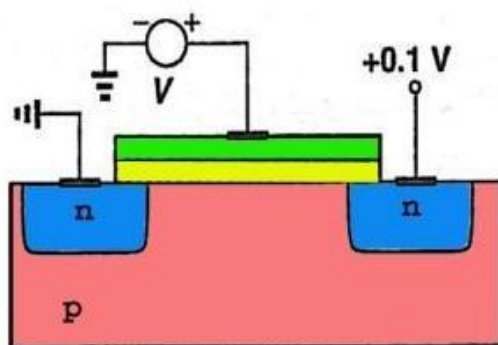


شکل ۲: ساختار یک ترانزیستور PMOS

توجه کنید که هر دو ترانزیستور NMOS و PMOS، نسبت به سورس و درین ساختار متقارنی دارند. در هر دو ترانزیستور طول گیت را در امتداد مسیر بین سورس و درین است، طول کانال و راستای عمود بر آن را پهنای کانال می‌نامیم.

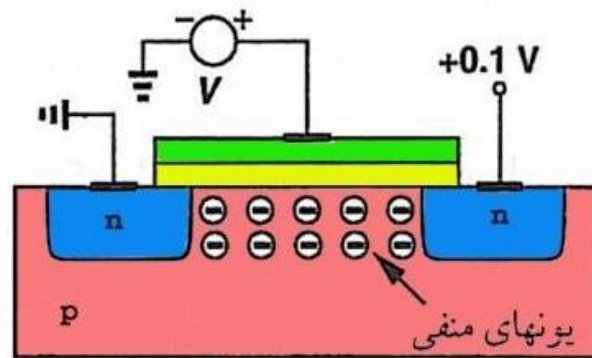
۲- عملکرد ترانزیستور MOS

در این بخش نیز ابتدا عملکرد ترانزیستور NMOS را شرح می‌دهیم. و سپس به‌طور مشابه عملکرد ترانزیستور PMOS را از روی آن شرح خواهیم داد. بسیار خوب، یک ترانزیستور NMOS را در نظر می‌گیریم که مطابق شکل ۳ به منبع ولتاژ متصل شده است (گیت را به پتانسیل مثبت متصل می‌کنیم. همچنین درین را به پتانسیل مثبت و سورس را به زمین متصل می‌کنیم).



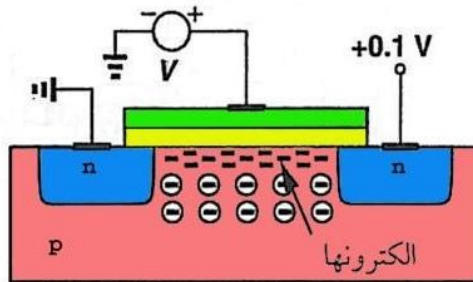
شکل ۳: یک ترانزیستور NMOS متصل به منبع ولتاژ

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌کنیم با افزایش ولتاژ پایانه‌ی گیت، بار مثبت در این پایانه تجمع می‌کند (در واقع بار مثبت به دلیل اتصال به پایانه‌ی مثبت منبع ولتاژ، در گیت جمع می‌شود). به دلیل وجود یک لایه‌ی اکسید که نارسانای الکتریکی است، بار در محل گیت باقی می‌ماند و جمع می‌شود. در اثر پدیده‌ی القای الکتریکی، حفره‌های موجود در زیربنای نوع p ، که دارای بار مثبت هستند، از زیر سطح گیت رانده می‌شوند و یون‌های منفی به جای می‌مانند (شکل ۴ را ببینید). این ناحیه را که تعدادی از حامل‌های بار الکتریکی از آن رانده شده است، ناحیه‌ی تهی می‌نامیم.



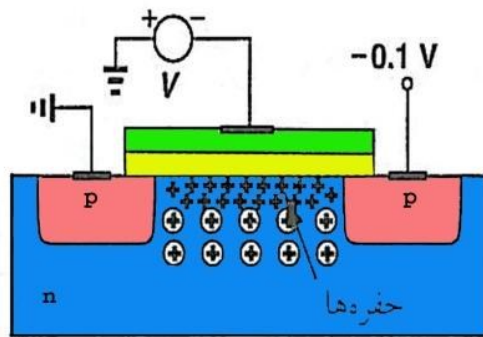
شکل ۴: در اثر پدیده‌ی القای الکتریکی، حفره‌های موجود در زیربنای نوع p از زیر سطح گیت رانده می‌شوند و یون‌های منفی به جای می‌مانند

تا کنون و تحت این شرایط هیچ جریان الکتریکی به وجود نیامده است. زیرا مسیر بین سورس و درین به اندازه‌ی کافی دارای حامل بار الکتریکی نیست. با افزایش ولتاژ گیت به تدریج تعدادی از الکترون‌های آزاد که در ناحیه‌ی سورس قرار دارند به محدوده‌ی زیر اکسید گیت وارد می‌شوند (دلیل این اتفاق آن است که ولتاژ گیت و همچنین درین مثبت است و بار الکترون‌ها منفی است. بنابراین با افزایش ولتاژ مثبت، الکترون‌ها به دلیل نیروی جاذبه‌ی الکتریکی تمایل پیدا می‌کنند که به سمت درین حرکت کنند). چنانچه ولتاژ گیت را باز هم بیشتر کنیم، با توجه به اینکه ولتاژ درین نیز مثبت (شکل ۳) است و الکترون‌ها را به سمت خود جذب می‌کند، الکترون‌های آزاد از سورس به درین منتقل می‌شوند و جریان الکتریکی ایجاد می‌شود. به این ترتیب یک کانال یا مسیر از حامل‌های بار الکتریکی، که در این‌جا از نوع الکترون‌های آزاد است، بین سورس و درین و زیر لایه‌ی نازک اکسید، تشکیل می‌شود (شکل ۵). در این حالت می‌گوییم ترانزیستور روشن است. مقدار ولتاژ گیت را که به ازای آن این اتفاق می‌افتد، ولتاژ آستانه می‌نامیم.



شکل ۵: با افزایش ولتاژ گیت به تدریج تعدادی از الکترون‌های آزاد که در ناحیه‌ی سورس قرار دارند به محدوده‌ی زیر اکسید گیت وارد می‌شوند.

عملکرد ترانزیستور PMOS و پدیده‌ی روشن شدن در آن مشابه ترانزیستور NMOS است، با این تفاوت که همه‌ی ولتاژها معکوس می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌کنیم، اگر ولتاژ گیت به اندازه‌ی کافی منفی شود، لایه‌ای وارون حالت قبل (شکل ۵) در زیر لایه‌ی اکسید تشکیل می‌شود. این لایه که شامل حامل‌های بار الکتریکی از نوع حفره‌های آزاد است، برای برقراری جریان الکتریکی مسیری بین درین و سورس فراهم می‌کند.



شکل ۶: اگر ولتاژ گیت به اندازه‌ی کافی منفی شود، یک لایه‌ی وارون از حفره‌ها در زیر لایه‌ی اکسید تشکیل می‌شود.

۳- ترانزیستور MOS به عنوان کلید

همان‌طور که گفتیم پدیده‌ی روشن شدن ترانزیستور NMOS و PMOS یک پدیده‌ی تدریجی است. در ترانزیستور NMOS اگر ولتاژ گیت بالا باشد، سورس و درین به یکدیگر متصل هستند و اگر ولتاژ گیت پایین باشد، سورس و درین از یکدیگر جدا هستند. این پدیده مشابه عملکرد یک کلید است. همان‌گونه که اگر کلید را در یک جهت فشار دهیم، لامپ روشن می‌شود و اگر در جهت دیگر فشار دهیم لامپ خاموش می‌شود. در ترانزیستور PMOS اگر ولتاژ گیت پایین باشد، سورس و درین به یکدیگر متصل هستند و اگر ولتاژ گیت بالا

باشد، سورس و درین از یکدیگر جدا هستند. می‌بینیم که عملکرد ترانزیستور NMOS و PMOS به عنوان کلید دقیقاً برعکس یکدیگر است.

عملکرد ترانزیستور MOS به عنوان کلید، ویژگی بسیار مهمی است که اساس ساخت صدها مدار الکترونیکی پیچیده و حافظه‌ها است.

منبع:

مجموعه مقالات سایت باشگاه نانو