

دانشگاه پیام نور
پی

الکترونیک آنالوگ

(رشته مهندسی برق)

دکتر حامد امین زاده دکتر محمد دانائی

امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.

مقام معظم رهبری

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتاب‌خوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چندهزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه‌ی فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه‌ی الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پر بار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه‌ی مطالعه‌ی هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد و رهبر معظم انقلاب اسلامی نیز از این وضعیت بارها اظهار گله و ناخشنودی نموده‌اند.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره‌ی دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه‌ی دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان، تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه‌ی بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاورد انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین

سوره‌ای که بر آن فرستاده‌ی عظیم‌الشان خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «إِقْرَأْ وَ رَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه‌ی انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده‌اند.

دانشگاه پیام‌نور با گستره‌ی جغرافیایی ایران شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه‌جا و همه‌وقت، به‌عنوان دانشگاهی کتاب‌محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه‌سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره‌گیری از تجربه‌های گرانقدر استادان و صاحب‌نظران برجسته کشورمان، کتاب‌ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام‌نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به‌طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب‌نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه‌ی مهم و خطیر یاری‌رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه‌ی خطیر یاری می‌رسانند، سپاسگزاری می‌نماییم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام‌نور را منزلگه اندیشه‌سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده‌اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام‌نور

فهرست مطالب

نه	پیشگفتار
۱	فصل اول: رفتار فرکانسی ترانزیستورهای دوقطبی و اثر میدان
۱	هدف کلی
۱	هدف‌های یادگیری
۱	مقدمه
۲	۱-۱ فیزیک ترانزیستورهای دوقطبی
۵	۲-۱ مدار معادل سیگنال-کوچک π برای ترانزیستورهای دوقطبی
۱۳	۳-۱ محدودیت‌های فرکانسی ترانزیستورهای دوقطبی
۲۰	۴-۱ فیزیک و رفتار فرکانسی ترانزیستورهای ماسفت
۲۵	۵-۱ فیزیک و رفتار فرکانسی ترانزیستورهای JFET
۲۷	۶-۱ بررسی پاسخ فرکانسی تقویت‌کننده‌ها در حالت کلی
۳۸	مسائل فصل اول
۴۳	فصل دوم: رفتار فرکانسی تقویت‌کننده‌ها در فرکانس‌های پایین
۴۳	هدف کلی
۴۳	هدف‌های یادگیری
۴۳	مقدمه
۴۴	۱-۲ اثر خازن‌های تزویج ورودی و بار در پاسخ فرکانس پایین
۵۱	۲-۲ اثر خازن‌های کنارگذر در پاسخ فرکانس پایین
۵۷	۳-۲ تحلیل کلی پاسخ فرکانس پایین و انتخاب اندازه خازن‌ها
۶۵	۴-۲ روش ثابت زمانی اتصال کوتاه برای محاسبه فرکانس قطع پایین

۶۷	مسائل فصل دوم
۷۱	فصل سوم: رفتار فرکانسی تقویت کننده‌ها در فرکانس‌های بالا
۷۱	هدف کلی
۷۱	هدف‌های یادگیری
۷۱	مقدمه
۷۲	۱-۳ قضیه میلر
۷۵	۲-۳ بررسی پاسخ فرکانسی تقویت کننده‌ها در فرکانس‌های بالا
۷۶	۱-۲-۳ تقویت کننده‌های امپتر مشترک و سورس مشترک
۸۴	۲-۲-۳ تقویت کننده‌های بیس مشترک و گیت مشترک
۸۷	۳-۲-۳ تقویت کننده‌های کلکتور مشترک و درین مشترک
۹۲	۴-۲-۳ تقویت کننده‌های آبشاری
۹۶	۵-۲-۳ تقویت کننده‌های متوالی کلکتور (درین) مشترک- امپتر (سورس) مشترک
۹۸	۶-۲-۳ تقویت کننده‌های تفاضلی
۱۰۵	۷-۲-۳ تقویت کننده‌های متوالی کلکتور (درین) مشترک- بیس (گیت) مشترک
۱۰۷	۳-۳ قضیه نسبت دهی قطب‌ها به گره‌ها
۱۱۱	۴-۳ روش ثابت زمانی‌های اتصال باز در محاسبه فرکانس قطع بالا
۱۱۶	۵-۳ استفاده از پاسخ پله به منظور یافتن فرکانس‌های قطع بالا و پایین
۱۲۰	مسائل فصل سوم
۱۲۹	فصل چهارم: رفتار فرکانسی تقویت کننده‌های حلقه بسته
۱۲۹	هدف کلی
۱۲۹	هدف‌های یادگیری
۱۲۹	مقدمه
۱۳۰	۱-۴ مفاهیم اولیه
۱۳۲	۲-۴ خصوصیات فیدبک منفی
۱۳۲	۱-۲-۴ کاهش بهره، حساسیت و اعوجاج
۱۴۰	۲-۲-۴ کاهش فرکانس قطع پایین
۱۴۰	۳-۲-۴ افزایش فرکانس قطع بالا و پهنای باند
۱۴۲	۴-۲-۴ تغییر در امپدانس‌های ورودی و خروجی
۱۴۴	۳-۴ تأثیر فیدبک بر روی پاسخ تقویت کننده‌ها
۱۴۵	۱-۳-۴ تقویت کننده‌های تک قطبی
۱۴۷	۲-۳-۴ قوانین رسم مکان هندسی ریشه‌ها
۱۵۰	۳-۳-۴ تقویت کننده‌های دو قطبی

۱۵۴	۴-۳-۴ تقویت‌کننده‌های سه‌قطبی و مرتبه بالاتر
۱۵۵	مسائل فصل چهارم
۱۵۹	فصل پنجم: فیدبک، پایداری و جبران‌سازی فرکانسی
۱۵۹	هدف کلی
۱۵۹	هدف‌های یادگیری
۱۵۹	مقدمه
۱۶۰	۱-۵ فیدبک و پایداری
۱۶۱	۲-۵ ملاک‌های پایداری
۱۶۲	۱-۲-۵ حاشیه بهره و حاشیه فاز
۱۷۱	۲-۲-۵ مکان هندسی ریشه‌ها و سایر ملاک‌های پایداری
۱۷۸	۳-۵ تابع انتقال باتروث
۱۷۹	۴-۵ جبران‌سازی فرکانسی
۱۸۱	۱-۴-۵ جبران‌سازی به کمک صفر
۱۸۷	۲-۴-۵ جبران‌سازی موازی
۱۹۳	۳-۴-۵ جبران‌سازی میلر
۲۰۰	مسائل فصل پنجم
۲۰۵	فصل ششم: تقویت‌کننده‌های قدرت
۲۰۵	هدف کلی
۲۰۵	هدف‌های یادگیری
۲۰۵	مقدمه
۲۰۶	۱-۶ انتقال توان از منبع سیگنال به بار
۲۰۹	۲-۶ انواع تقویت‌کننده‌های قدرت
۲۱۱	۳-۶ تقویت‌کننده‌های قدرت کلاس A
۲۱۷	۱-۳-۶ استفاده از منبع جریان جهت تغذیه
۲۱۹	۴-۶ تقویت‌کننده‌های قدرت کلاس B
۲۲۶	۵-۶ تقویت‌کننده‌های قدرت کلاس AB
۲۳۱	۱-۵-۶ استفاده از مدار محافظ جریان
۲۳۳	۲-۵-۶ استفاده از منبع جریان جهت تغذیه
۲۳۶	۳-۵-۶ استفاده از منبع جریان وابسته به سیگنال ورودی
۲۳۹	۴-۵-۶ تغذیه بارهای خازنی در پروسه CMOS
۲۴۰	۶-۶ ملاحظات حرارتی
۲۴۴	مسائل فصل ششم

۲۵۳	فصل هفتم: بررسی مدار داخلی تقویت‌کننده‌های عملیاتی و آشنایی با مشخصه‌ها
۲۵۳	هدف کلی
۲۵۳	هدف‌های یادگیری
۲۵۳	مقدمه
۲۵۴	۱-۷ تقویت‌کننده عملیاتی ایده‌ال
۲۵۷	۲-۷ کاربرد انواع تقویت‌کننده‌های عملیاتی
۲۶۲	۳-۷ آشنایی با مشخصه‌های یک تقویت‌کننده عملیاتی واقعی
۲۷۸	۴-۷ ساختمان داخلی آپ‌امپ‌های موجود در بازار
۲۷۹	۱-۴-۷ بررسی مدارهای داخلی آپ‌امپ ۷۴۱
۲۹۴	۲-۴-۷ تقویت‌کننده‌های عملیاتی در پروسه CMOS
۲۹۷	مسائل فصل هفتم
۳۰۱	فصل هشتم: نویز
۳۰۱	هدف کلی
۳۰۱	هدف‌های یادگیری
۳۰۱	مقدمه
۳۰۲	۱-۸ مفاهیم اولیه
۳۰۳	۱-۱-۸ نسبت سیگنال به نویز
۳۰۵	۲-۱-۸ چگالی طیف توان نویز
۳۰۶	۳-۱-۸ اثر تابع انتقال تقویت‌کننده بر نویز
۳۰۷	۴-۱-۸ پهنای باند معادل نویز
۳۰۸	۵-۱-۸ تابع چگالی احتمال نویز
۳۱۰	۶-۱-۸ منابع نویز همبسته و ناهمبسته
۳۱۱	۲-۸ نویز در عناصر الکتریکی غیرفعال
۳۱۱	۱-۲-۸ نویز گرمایی مقاومت
۳۱۴	۲-۲-۸ نویز در شبکه‌های غیرفعال
۳۱۷	۳-۸ نویز در ترانزیستور
۳۱۷	۱-۳-۸ نویز حرارتی کانال در ترانزیستور ماسفت
۳۱۹	۲-۳-۸ نویز حرارتی پلی سیلیکون گیت در ترانزیستور ماسفت
۳۲۰	۳-۳-۸ نویز سوسویی (فلیکر) در ترانزیستورهای ماسفت
۳۲۲	۴-۳-۸ منابع نویز در ترانزیستورهای دوقطبی
۳۲۳	مسائل فصل هشتم
۳۲۵	واژه‌نامه فارسی به انگلیسی
۳۲۹	کتاب‌نامه

تقدیم به حضرت ولی عصر (عج)

پیشگفتار

خداوند را شاکریم که به ما این افتخار و توانایی را داد که با نگارش این کتاب درسی، قدم کوچکی در آموزش کاربردی علم الکترونیک به دانشجویان عزیز برداریم. الکترونیک آنالوگ یکی از درس‌های مهم رشته مهندسی برق در سرفصل کنونی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری محسوب می‌شود. در این درس، خواننده با تحلیل مدارهای الکترونیکی در حوزه فرکانس آشنا می‌شود و طراحی مقدماتی مدار را با استفاده از نگرش حاصل فرامی‌گیرد. تحلیل در حوزه فرکانس، درک عمیق‌تری نسبت به عملکرد واقعی مدارهای الکترونیکی به دست می‌دهد.

کتاب حاضر شامل هشت فصل است که در مجموع مباحث مهمی از الکترونیک را پوشش می‌دهند. فصل‌های اول، دوم و سوم، شامل مفاهیم اصلی پاسخ فرکانسی ترانزیستورها و تقویت‌کننده‌ها در حوزه فرکانس می‌باشند. این سه فصل به ما نشان می‌دهند که بلوک‌های سازنده سامانه‌های الکترونیکی، از یک ترانزیستور ساده گرفته تا یک تقویت‌کننده چندطبقه، چه رفتاری در حوزه فرکانس دارند و چگونه می‌توان این رفتار را مدل‌سازی نمود. در فصل اول، به مطالعه شیوه مدل‌سازی ترانزیستور در فرکانس‌های بالا می‌پردازیم و مفهوم کلی پاسخ فرکانسی را به شکل کاربردی فرا می‌گیریم. در فصل دوم، با تحلیل پاسخ فرکانسی تقویت‌کننده در فرکانس‌های پایین آشنا شده و برخی قضایای مهم موجود در این حوزه را مطالعه می‌کنیم. فصل سوم

کتاب، به بررسی پاسخ فرکانسی تقویت‌کننده در فرکانس‌های بالا می‌پردازد و رفتار مدارهای مختلف در این بازه را مقایسه می‌کند. پس از مطالعه سه فصل اول کتاب، بایستی در مجموع خواننده درک مناسبی از تحلیل و طراحی تقویت‌کننده‌های ترانزیستوری در حوزه فرکانس داشته باشد. فصل‌های چهارم و پنجم شامل مطالب مهمی در خصوص فیدبک و تأثیر آن در شکل‌دهی به پاسخ فرکانسی و پایداری تقویت‌کننده می‌باشند. فیدبک، یک روش سودمند و پرکاربرد در طراحی الکترونیک بوده و قادر است مشخصه‌های اصلی تقویت‌کننده را به‌طور کامل تغییر دهد. اما کاربرد آن تنها به مهندسی الکترونیک محدود نمی‌شود و سایر شاخه‌های علمی از جمله مکانیک، زیست‌شناسی و حتی جامعه‌شناسی را نیز در برمی‌گیرد. فیدبک منفی ما را قادر می‌سازد که پردازش سیگنال‌ها را با دقت بیشتر و در بازه فرکانسی گسترده‌تری انجام دهیم. در این کتاب به‌طور خاص، تأثیر فیدبک را بر روی پایداری و پهنای باند تقویت‌کننده مورد بررسی قرار می‌دهیم. فصل ششم، به بحث در مورد تقویت‌کننده‌های قدرت و روابط حاکم بر آن‌ها اختصاص دارد. وظیفه اصلی تقویت‌کننده‌های قدرت، تأمین قدرت مورد نیاز به‌منظور تغذیه بارهای سنگین در خروجی مدار است. با مرور نقاط ضعف و قوت هر مدار، به اصلاح آن در مدارهای بعدی می‌پردازیم تا در نهایت به مدارهای کارآمدتر با قابلیت تأمین بهینه توان برسیم. با استفاده از مدارها و تحلیل‌های انجام‌گرفته در فصل‌های اول تا ششم، فصل هفتم به بررسی مدارهای داخلی تقویت‌کننده‌های عملیاتی (آپ‌امپ) و آشنایی با مشخصه‌های اصلی آن‌ها می‌پردازد. تقویت‌کننده‌های عملیاتی نوع خاصی از انواع تقویت‌کننده‌ها هستند که قادرند تفاضل دو ورودی را با بهره زیاد تقویت کنند. پس از آشنایی با معیارهای شایستگی و کاربردهای تقویت‌کننده‌های عملیاتی در فصل هفتم، مدار داخلی آپ‌امپ ۷۴۱ ارائه شده و تحلیل این عنصر از ابعاد مختلف را با بررسی مدار داخلی به انجام می‌رسانیم. آپ‌امپ ۷۴۱، همچنان یکی از پرکاربردترین آپ‌امپ‌های موجود در بازار است و انتخاب این آپ‌امپ برای تحلیل در فصل هفتم، بر همین مبنا صورت گرفته است. در این فصل همچنین راه‌حل نوینی ارائه می‌شود که در بررسی ارتباط میان زمان نشست با پهنای باند تقویت‌کننده‌ها راهگشا خواهد بود. با استفاده از این راهکار، تعیین زمان نشست خروجی تقویت‌کننده ممکن می‌شود. فصل آخر، به مسئله نویز در

تقویت‌کننده‌ها اختصاص دارد. نویز، یک سیگنال الکتریکی ناخواسته با ماهیت تصادفی است که با سیگنال اصلی حاوی اطلاعات مخلوط شده و دقت پردازش را کاهش می‌دهد. نویز یکی از پیچیده‌ترین مؤلفه‌ها در طراحی و تحلیل مدارهای الکترونیکی است که در فصل هشتم به صورت ابتدایی و با ارائه روابط اولیه بررسی خواهد شد.

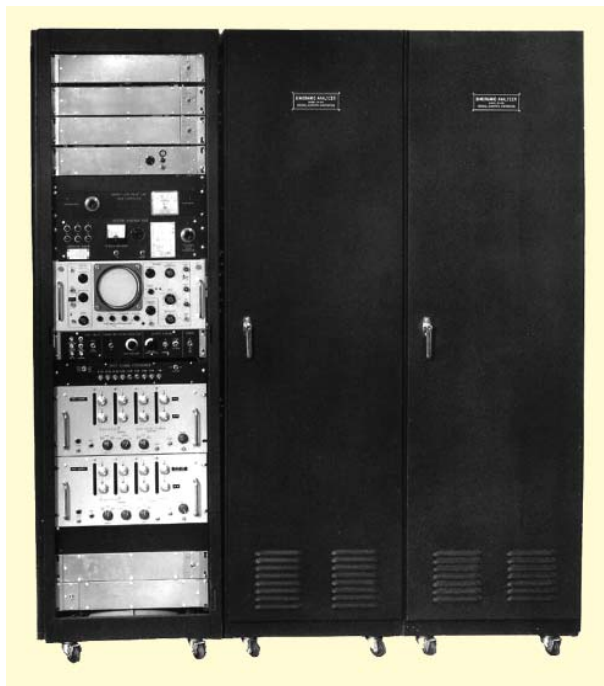
در تمامی فصل‌های کتاب سعی شده است تا با ارائه مثال‌های مفهومی، درک مطالب برای دانشجویان ساده‌تر گردد. مرجع دهی مناسب نیز در همه فصل‌ها صورت گرفته است تا علاقه‌مندان بتوانند به مطالب تکمیلی‌تر دست پیدا کنند. در انتهای برخی فصل‌ها تمرین شبیه‌سازی نیز در نظر گرفته شده است تا به فهم بهتر مطالب درسی کمک شود. در صورت فراهم بودن امکانات، اساتید محترم می‌توانند از این تمرین‌ها برای ارزیابی بهتر دانشجویان استفاده کنند. در پایان بر خود لازم می‌دانیم که از آقای مهندس سید محمد فضایی که ما را در طراحی روی جلد این کتاب یاری دادند سپاسگزاریم. از آقایان دکتر سید جواد جوادی مقدم و دکتر کریم عباسیان که ویرایش ادبی و علمی این کتاب را بر عهده داشتند قدردانی می‌کنیم. از آقای مهندس محمد جمالی که زحمت مطالعه و اصلاح این کتاب را کشیده‌اند کمال تشکر را داریم. باوجود تلاش فراوان، نگارنده این اثر خالی از اشکال ندانسته و از کلیه همکاران و دانشجویان گرامی صمیمانه درخواست می‌کند که با ارسال نظرات و پیشنهادهای خود، ما را در اصلاح هرچه بهتر کتاب در ویرایش‌های آتی یاری کنند.

حامد امین‌زاده

عضو هیأت علمی

دانشگاه پیام نور

بهار ۱۳۹۸



هنری بیگل، آرتور پینی و رینهولد ووگل؛ بی گمان این سه دانشمند نقش بی ماندی در ساخت اولین نمونه های تحلیل کننده طیف فرکانسی داشته اند [۱].

فصل اول

رفتار فرکانسی ترانزیستورهای دوقطبی و اثر میدان

هدف کلی

آشنایی با فیزیک ترانزیستورهای دوقطبی و اثر میدان و تحلیل آنها در حوزه فرکانس.

هدف‌های یادگیری

خواننده پس از مطالعه دقیق این فصل باید بتواند:

- رفتار فیزیکی ترانزیستورهای دوقطبی را در فرکانس‌های بالا توضیح دهد.
- فیزیک ترانزیستورهای اثرمیدان و نحوه مدل‌سازی آنها در فرکانس‌های بالا را شرح دهد.
- پاسخ فرکانسی تقویت‌کننده‌های خطی را بر مبنای رفتار فیزیکی ترانزیستورهای سازنده، مدل‌سازی و ترسیم نماید.

مقدمه

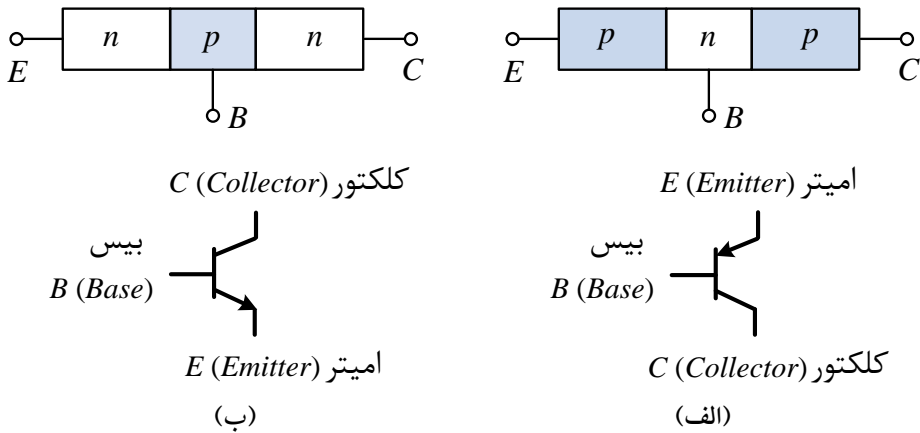
به منظور بررسی و مطالعه پاسخ فرکانسی مدارهای ترانزیستوری، پیش از هر چیزی نیازمند کسب دانشی عمیق‌تر از رفتار ترانزیستورهای سازنده در حوزه فرکانس هستیم. در این فصل، به بررسی اثراتی می‌پردازیم که به‌طور مستقیم در رفتار و عملکرد ترانزیستورهای دوقطبی (BJT) و اثر میدان (FET) در حوزه فرکانس نقش دارند. در نهایت، مدارهای خطی معادلی ارائه می‌دهیم که می‌توان آنها را با ترانزیستور اصلی

جایگزین و به منظور تحلیل در حوزه فرکانس به کار برد. در انتهای این فصل، به مدل سازی پاسخ فرکانسی می پردازیم و نحوه رسم آن در حوزه فرکانس را با استفاده از دیاگرام بود^۱ شرح می دهیم.

۱-۱ فیزیک ترانزیستورهای دوقطبی

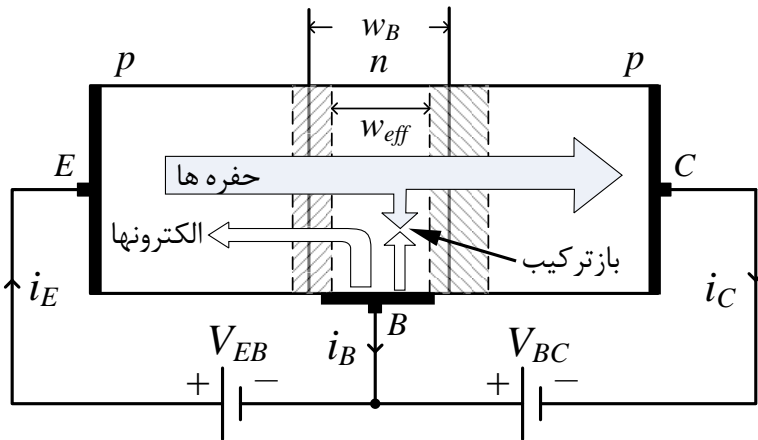
ترانزیستورها، عناصر غیرخطی هستند به این معنا که با تغییر جریان یا ولتاژ ورودی آن ها، جریان و ولتاژ خروجی به طور متناسب تغییری نمی کند. از آنجاکه تحلیل مدارهای غیرخطی اغلب مشکل و پیچیده است مایل هستیم که رفتار ترانزیستورها را حول وحوش نقطه کار آن ها، با یک مدل خطی تقریبی جایگزین کنیم. قبل از هر چیز در این قسمت به مطالعه اختصاری فیزیک ترانزیستورها می پردازیم تا ابزار لازم برای مدل سازی دقیق را به دست آوریم. شکل ۱-۱، نماد مداری و ساختار فیزیکی دو گونه ترانزیستور دوقطبی یعنی pnp و nnp با سه پایانه کلکتور (C)، بیس (B) و امیتر (E) را نشان می دهد. ترانزیستورهای دوقطبی از نیمه هادی های نوع n و p ساخته شده اند که در نوع سیلیکونی، به ترتیب با تزریق اتم های پنج ظرفیتی و سه ظرفیتی به بلور سیلیسیوم خالص به دست می آیند [۲]. بسته به ترتیب قرار گرفتن نیمه هادی ها در نواحی امیتر، بیس و کلکتور، ترانزیستورهای pnp و nnp از یکدیگر متمایز می شوند. از لحاظ آماری، نیمه هادی نوع n الکترون آزاد بیشتری در نوار هدایت و نیمه هادی نوع p جای خالی الکترون بیشتری در نوار ظرفیت دارند. جای خالی الکترون در نوار ظرفیت، حفره نام دارد و دارای بار الکتریکی مثبت و به همان اندازه بار الکتریکی الکترون آزاد است [۲].

ترانزیستورهای دوقطبی، عناصر قابل کنترل با جریان هستند که برای ادامه کار نیاز به یک جریان تغذیه ورودی دارند. اگر نقش حفره ها در ترانزیستور pnp را با الکترون ها در nnp عوض کنیم، عملکرد فیزیکی این دو، مشابه خواهند شد. با اعمال میدان الکتریکی به نیمه هادی نوع p (یا n)، حامل های اکثریت در آن یعنی حفره ها (الکترون ها) هم جهت با میدان الکتریکی (یا خلاف جهت آن) سرعت گرفته و جریان الکتریکی ایجاد می کنند. شکل ۱-۲ نحوه تغذیه یک ترانزیستور pnp را در ناحیه فعال



شکل ۱-۱. نماد مداری ترانزیستورهای دوقطبی. (الف) pnp و (ب) npn

نشان می‌دهد. در این ناحیه، دیود پیوند امیتر-بیس (EB) به صورت مستقیم و دیود پیوند کلکتور-بیس (CB)، معکوس تغذیه شده است. برای بهینه‌سازی عملکرد ترانزیستور، باید چگالی ناخالصی تزریق شده به ناحیه E (N_E) بسیار بیشتر از ناحیه B (N_B) و چگالی ناخالصی B بیشتر از ناحیه C (N_C) باشد ($N_E \gg N_B > N_C$) [۳]. میدان الکتریکی ناشی از اعمال ولتاژ مستقیم V_{EB} باعث می‌شود که حفره‌ها از امیتر به سمت بیس سرعت بگیرند. الکترون‌های اضافی ناشی از این جابه‌جایی، توسط پایانه امیتر جذب شده و جریان ورودی به امیتر (i_E) را می‌سازند. در زمان ساخت، عرض ناحیه



شکل ۱-۲. ساختار فیزیکی ترانزیستور pnp و نحوه تغذیه قطعه.

بیس (w_B) بسیار باریک در نظر گرفته می‌شود. لذا با توجه به سرعت بالای حامل‌ها تنها تعداد کمی از حفره‌های ورودی از امیتر به بیس این شانس را خواهند داشت که با الکترون‌های موجود در ناحیه بیس بازترکیب شده و در ساخت جریان کوچک بیس i_B تأثیر بگذارند [۲]. علی‌رغم اینکه پیوند CB توسط V_{BC} تغذیه معکوس شده است، مابقی حفره‌ها با سرعت بالا به ناحیه کلکتور سرازیر می‌شوند. این حفره‌ها با الکترون‌های جذب‌شده از پایانه کلکتور بازترکیب می‌شوند و جریان کلکتور i_C را ایجاد می‌کنند. به این ترتیب، در ناحیه فعال $i_E \simeq i_C$ خواهد بود. در حالت کلی، طبق قانون جریان رابطه زیر میان جریان سه پایانه برقرار است.

$$i_E = i_C + i_B \quad (1-1)$$

با تعریف β به‌عنوان بهره جریان مدار امیتر مشترک، رابطه i_C و i_B در ناحیه فعال عبارت است از $i_C = \beta \times i_B$ می‌باشد. منفی شدن V_{BC} تا بیش از چند دهم ولت در شکل ۱-۲، ترانزیستور را وارد ناحیه اشباع می‌کند. در این ناحیه، جریان کلکتور از رابطه ناحیه فعال پیروی ننموده و کوچک‌تر از βi_B است ($i_C < \beta \times i_B$). متغیر β وابسته به عرض و چگالی ناخالصی در ناحیه بیس است و برای افزایش آن تا حد امکان w_B را باید هنگام ساخت کاهش داد. با تغذیه ترانزیستور در آرایش شکل ۱-۲، در عمل دو ناحیه تهی از حامل در محل پیوندها شکل می‌گیرند. عرض این نواحی در کلکتور، بیس و امیتر متأثر از چگالی ناخالصی و ولتاژهای V_{BC} و V_{EB} است. به دلیل عدم وجود حامل در نواحی تهی، در آن‌ها امکان بازترکیب الکترون با حفره وجود ندارد (امکان بازترکیب تنها در ناحیه خنثی $w_{eff} < w_B$ وجود دارد). بنابراین با افزایش V_{BC} و گسترده‌شدن عرض ناحیه تهی در بیس، حفره‌های کمتری این فرصت را خواهند داشت تا با الکترون‌ها در این ناحیه بازترکیب شوند. لذا، جریان i_C علاوه بر V_{EB} به V_{EC} نیز وابسته می‌گردد.

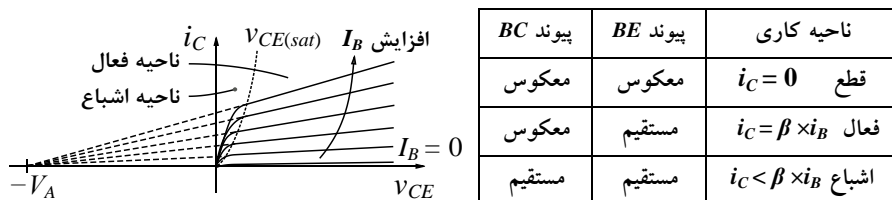
شکل ۱-۳، منحنی i_C برحسب v_{CE} و نواحی کاری یک ترانزیستور nnp را نشان می‌دهد. به ازای یک v_{BE} مشخص، i_C در ناحیه اشباع (به ازای ولتاژ V_{CE} از 0 تا ولتاژ اشباع ($V_{CE}(sat)$) شدیداً متأثر از v_{CE} می‌باشد. این وابستگی شدید در ناحیه فعال کم‌رنگ‌تر شده و تنها به دلیل تغییرات اندک عرض ناحیه تهی با تغییر v_{CE} ایجاد

می‌شود. در حالت کلی، جریان i_C در ناحیه فعال ترانزیستورهای npn و pnp به ترتیب از روابط (۲-۱) و (۳-۱) به دست می‌آید.

$$npn: \quad i_C = I_{S,n} (e^{v_{BE}/V_T} - 1) \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right), \quad (2-1)$$

$$pnp: \quad i_C = I_{S,p} (e^{v_{EB}/V_T} - 1) \left(1 + \frac{v_{EC}}{V_A} \right). \quad (3-1)$$

در روابط بالا، $I_{S,n}$ و $I_{S,p}$ به ترتیب جریان اشباع معکوس پیوند BE برای ترانزیستورهای npn و pnp است. ولتاژ گرمایی با نماد $V_T = kT/q$ دمای مطلق (برحسب درجه کلوین، $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ بار الکترون و $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/k}$ ثابت بولتزمن) در دمای اتاق تقریباً برابر با 26 mV است. اگر منحنی‌های جریان - ولتاژ شکل ۳-۱ را امتداد دهیم همگی در یک نقطه موسوم به ولتاژ ارلی V_A (با اندازه‌ای از مرتبه 50 V تا 100 V) با یکدیگر برخورد می‌کنند. هر چه ولتاژ ارلی بزرگ‌تر باشد، با تقریب بهتری می‌توان در ناحیه فعال از وابستگی i_C به v_{CE} صرف‌نظر کرد [۴].



شکل ۳-۱. جریان کلکتور برحسب ولتاژ کلکتور - امیتر در یک ترانزیستور npn .

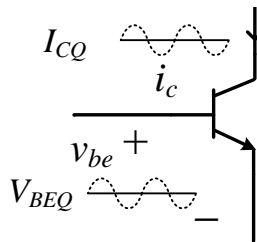
۲-۱ مدار معادل سیگنال - کوچک π برای ترانزیستورهای دوقطبی

هدف از ارائه مدل‌های سیگنال - کوچک، جایگزین نمودن ترانزیستور آن حول نقطه کار آن است تا بتوان تحلیل مدارهای الکترونیکی را ساده‌تر انجام داد [۵]. در این قسمت به معرفی مدار معادل سیگنال - کوچک π ترانزیستور دوقطبی می‌پردازیم و پارامترهای مرتبط با آن را تشریح می‌کنیم. روابط به‌دست‌آمده تنها برای ترانزیستور نوع npn برقرار هستند. باین‌حال، به‌سادگی می‌توان این روابط را با تغییر جهت ولتاژها و جریان‌ها به نوع pnp نیز بسط داد. بنا بر قرارداد، جریان‌ها و ولتاژهای سیگنال - کوچک

را با حروف انگلیسی کوچک (حرف و اندیس، هر دو کوچک مانند i_x و v_x)، جریان‌ها و ولتاژهای dc را با حروف بزرگ (مثل I_X و V_X) و جریان‌ها و ولتاژهای کلی سیگنال-بزرگ، شامل هر دو مؤلفه را با حرف اصلی کوچک و اندیس بزرگ (مانند i_X و v_X) نشان می‌دهیم.

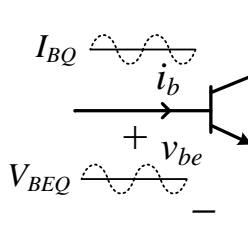
الف) هدایت انتقالی g_m : با نوسان کوچک ولتاژ بیس-امیتر v_{be} حول نقطه کار، جریان کلکتور i_c نیز متناسب با آن تغییر می‌کند (شکل ۴-۱). هدایت انتقالی، برابر با نسبت جریان سیگنال-کوچک خروجی به ولتاژ سیگنال-کوچک ورودی یا i_c/v_{be} است. به ازای دامنه نوسان کوچک، این پارامتر با مشتق رابطه (۲-۱) در اطراف جریان نقطه کار کلکتور (I_{CQ}) برابر خواهد بود.

$$g_m = \frac{i_c}{v_{be}} = \frac{\partial i_c}{\partial v_{BE}} = \frac{I_{S,n}}{V_T} e^{v_{BE}/V_T} \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right) \approx \frac{I_{CQ}}{V_T} \quad (4-1)$$



شکل ۴-۱. محاسبه هدایت انتقالی.

ب) مقاومت r_π یا $r_{\pi Q}$: متغیر دیگری که در رفتار سیگنال - کوچک ترانزیستور تأثیر به سزایی دارد مقاومت r_π یا $r_{\pi Q}$ است که نشان‌دهنده نسبت تغییرات جریان بیس i_B با تغییرات v_{BE} حول نقطه کار می‌باشد (شکل ۵-۱).



شکل ۵-۱. محاسبه مقاومت r_π .