

فصل ۳

ترانزیستور اثر میدان (FET)

هدف‌های فصل

دانشی	مهارتی	نگرشی
۱- آشنایی با اساس عملکرد FET و مقایسه آن با BJT	۱- توانایی تحلیل ولتاژ و جریان پایه‌های ترانزیستور FET	۱- درک چگونگی تقویت سیگنال در ترانزیستور اثر میدان
۲- آشنایی با ساختمان ترانزیستورهای JFET و MOSFET	۲- توانایی پیدا کردن نقطه کار DC ترانزیستورهای FET	۲- بررسی چند مدار عملی ساخته شده با استفاده از ترانزیستورهای FET
۳- آشنایی با نحوه بایاسینگ صحیح ترانزیستورهای FET	۳- توانایی تشخیص ناحیه کار ترانزیستورهای FET	۳- کمک به درک تفاوت‌های FET و BJT
۴- آشنایی با مشخصات تقویت کننده‌های FET	۴- توانایی مقایسه مشخصات FET و MOSFET	۴- شناخت FET به عنوان یک قطعه کنترل شونده با ولتاژ

سرفصل‌ها و عناوین اصلی

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

مفاهیم اساسی فصل

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

مراحل پیشنهادی برای تدریس

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

دانستنی‌ها و پیش نیازهای مورد نیاز برای آسان شدن یادگیری مطالب فصل

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

مهارت‌های اصلی معرفی شده در فصل که یادگیری آن‌ها برای دانش‌آموزان ضروری است.

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

ارتباط مباحث مطرح شده در فصل با فناوری‌های رایج

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

نحوه ارزشیابی و مقدار زمان اختصاص داده شده به هر قسمت از فصل

همکاران محترم می‌توانند با توجه به وضعیت درسی دانش‌آموزان در میزان زمان در نظر گرفته شده برای هر قسمت یا روش ارزشیابی، به صلاحدید خود تجدید نظر کنند. زمان تدریس با توجه به سطح کلاس، بودجه‌بندی ارائه شده در کتاب کارگاه الکترونیک عمومی ۲ و نظر معلم انجام می‌شود.

سرفصل مطالب	هدف‌ها در قلمرو دانش، مهارت و نگرش	محتوا و فعالیت‌های یادگیری	روش‌های پیشنهادی برای ارزشیابی	ابزارهای اندازه‌گیری پیشنهادی	زمان پیشنهادی برای تدریس (ساعت)	توضیحات
ترانزیستور با اثر میدان پیوندی یا JFET	آشنایی با ساختار فیزیکی، منحنی مشخصه خروجی و انتقالی ترانزیستور اثر میدان و توانایی تشخیص ناحیه کار آن	بحث، مطالعه، حل تمرین	تکوینی، مجموعی	تشریحی و محاسباتی	۴	پرسش در مورد چگونگی برقراری جریان در ترانزیستور در قالب سؤالات تشریحی ارزیابی توانایی دانش‌آموزان در تعیین ناحیه کار ترانزیستور با استفاده از سؤالات محاسباتی.
تغذیه JFET	توانایی محاسبه نقطه کار و خط بار DC ترانزیستور و استفاده از روابط جریان و ولتاژ ترانزیستور	حل تمرین	تکوینی، مجموعی	تشریحی و محاسباتی	۳	پرسش در مورد روش‌های بایاس ذکر شده و ویژگی‌های آن‌ها در قالب سؤالات تشریحی محاسبه نقطه کار و خط بار DC ترانزیستور

موارد کاربرد ترانزیستورهای اثر میدان	شناخت برخی از قابلیت‌های ترانزیستور اثر میدان برای به کارگیری در مدارات عملی با توجه به ویژگی‌های آن	بحث، مطالعه	تکوینی	تشریحی	۲	پرسش در مورد نقش ترانزیستور اثر میدان در هریک از مدارات ذکر شده در کتاب درسی و ویژگی مورد استفاده شده از ترانزیستور در آن مدار در قالب سؤالات تشریحی
تقویت کننده‌های سیگنال کوچک FET	آشنایی با آرایش‌های مختلف برای تقویت کنندگی و بررسی مشخصات آن‌ها	بحث، مطالعه	تکوینی	تشریحی	۲	پرسش در مورد نحوه تقویت سیگنال در FET و چگونگی اعمال و دریافت سیگنال ورودی خروجی به پایه‌های مختلف آن در آرایش‌های مختلف
مقایسه تقویت کننده‌های BJT با تقویت کننده‌های FET	بررسی ویژگی‌های مشابه و متفاوت دو نوع تقویت کننده	بحث، مطالعه	مجموعی	تشریحی	۱	پرسش در مورد دانسته‌های قبلی دانش‌آموزان در مورد BJT و مقایسه آن‌ها با FET
ترانزیستور اثر میدان با گیت عایق IGFET	آشنایی با ساختمان و طرز کار ترانزیستورهای MOSFET	مطالعه، حل تمرین	تکوینی، مجموعی	تشریحی	۴	پرسش در مورد مشخصات فیزیکی و بایاس مناسب این ترانزیستور در قالب سؤالات تشریحی

۳-۱- پیشگفتار (صفحه ۶۲ از کتاب درسی)

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

 آزمونک ۱

چرا از FET به عنوان طبقه ورودی بسیاری از مدارات استفاده می‌شود و چه عاملی استفاده مشابه از BJT را محدود می‌کند؟
پاسخ: مقاومت ورودی FET بسیار زیاد است و از این رو جریان اندکی از مدارهای متصل به آن کشیده می‌شود. از طرفی مقاومت ورودی BJT‌ها به علت جریان ورودی زیاد، نسبتاً کم است و برای استفاده به عنوان طبقات اول مدارهای الکترونیکی مناسب نیستند.

 آزمونک ۲

چرا ترانزیستورهای اثر میدان را تک پیوندی یا یک قطبی می‌نامند؟
پاسخ: از آنجا که برای ساخت یک ترانزیستور اثر میدان، یک ناحیه ناخالصی به یک قطعه نیمه‌هادی با ناخالصی نوع مخالف نفوذ داده شده و تنها از دو نوع نیمه‌هادی استفاده می‌شود، به آن ترانزیستور تک پیوندی یا یک قطبی می‌گویند.

۳-۲- ترانزیستور با اثر میدان پیوندی یا JFET (صفحه ۶۳ از کتاب درسی)

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

۳-۲-۱- سه مدل برای درک نحوه عملکرد JFET: به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

(۲) **مدل منبع جریان:** این مبحث دانش افزایی است. به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

(۳) **مدل جریان آب:** به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

 آزمونک ۳

چرا جریان اشباع ترانزیستور اثر میدان تقریباً ثابت است؟

پاسخ: وقتی V_{DS} شروع به افزایش می‌کند ناحیه تهی شده از حامل‌های جریان در کانال نفوذ می‌کند و باعث افزایش جریان درین می‌شود. این افزایش ولتاژ تا یک میزان خاص می‌تواند موجب افزایش جریان درین شده و با رسیدن جریان درین به مقدار بیشینه‌اش، نسبت افزایش V_{DS} به مقاومت کانال (ناشی از گسترش لایه تهی) برابر می‌شود.

آزمونک ۴

ولتاژ بحرانی، پدیده شکست بهمنی و ولتاژ آستانه (یا قطع) را به‌طور مختصر تعریف کنید.

پاسخ: ولتاژی را که منجر به حداکثر گرفتگی کانال می‌شود ولتاژ بحرانی می‌گویند.

در ناحیه اشباع، با افزایش ولتاژ درین – سورس در میزان جریان درین تغییری حاصل نمی‌شود اما با افزایش بیش از اندازه این ولتاژ ترانزیستور می‌سوزد که به این پدیده، شکست بهمنی می‌گویند.

با فرض ولتاژ درین – سورس بزرگ‌تر از ولتاژ بحرانی، آن مقدار از ولتاژ معکوس گیت – سورس که باعث صفر شدن جریان درین می‌شود؛ ولتاژ آستانه یا قطع نامیده می‌شود.

پرسش ۱

منحنی مشخصه JFET به‌طور کلی چه چیزی را نشان می‌دهد:

الف) ولتاژ درین بر حسب جریان سورس (ب) جریان درین بر حسب جریان گیت

پ) جریان درین بر حسب ولتاژ درین (ت) ولتاژ درین بر حسب جریان گیت

پاسخ: پاسخ صحیح گزینه پ است. منحنی مشخصه JFET جریان درین را بر حسب تغییرات ولتاژ درین – سورس و به ازای مقادیر مختلف ولتاژ گیت – سورس نشان می‌دهد.

پرسش ۲

در یک JFET با کانال نوع n، گرفتگی کانال وقتی اتفاق می‌افتد که بایاس گیت:

الف) مقداری مثبت باشد. (ب) صفر باشد. (پ) مقداری منفی باشد. (ت) خیلی منفی باشد.

پاسخ: گزینه ت پاسخ صحیح است. اعمال ولتاژ مثبت به گیت ممکن است باعث سوختن JFET شود. وقتی ولتاژ گیت صفر باشد (در حالی که سورس به زمین متصل است) JFET روشن است و بیشترین مقدار جریان از درین آن عبور می‌کند. هنگامی که ولتاژ گیت نسبت به سورس منفی باشد JFET روشن است اما جریانی کمتر از جریان ماکزیمم از درین می‌گذرد. با افزایش ولتاژ معکوس گیت – سورس و عبور آن از حد ولتاژ آستانه JFET به دلیل گرفتگی کانال خاموش می‌شود.

زمونک ۵

در چه صورت JFET مانند یک مقاومت اهمی عمل می‌کند؟

پاسخ: با مراجعه به منحنی مشخصه JFET می‌توان فهمید تا هنگامی که V_{DS} از ولتاژ بحرانی کمتر است، افزایش جریان درین متناسب با افزایش ولتاژ درین – سورس است و عملکرد ترانزیستور همانند یک مقاومت اهمی است.

آزمونک ۶

شیب منحنی مشخصه در ناحیه اهمی نشان دهنده چیست و با چه عاملی و به چه صورت تغییر می‌کند؟

پاسخ: چون منحنی مشخصه JFET نشان دهنده تغییرات جریان درین بر حسب تغییرات ولتاژ درین – سورس است، شیب منحنی برابر با عکس مقاومت کانال و بیانگر میزان قابلیت هدایت کانال است. شیب این منحنی با تغییرات ولتاژ معکوس گیت – سورس تغییر می‌کند و با افزایش این ولتاژ کاهش می‌یابد.

آزمونک ۷

به چه نحو می توان ناحیه خطی JFET را افزایش داد؟

پاسخ: با اتصال یک مقاومت فیدبک بین درین و گیت می توان ناحیه خطی JFET را افزایش داد.

آزمونک ۸

در رابطه جریان درین برای یک JFET که در ناحیه اشباع کار می کند، I_{DSS} نشان دهنده چیست؟

پاسخ: جریان درین در ناحیه اشباع با استفاده از رابطه $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}}\right)^2$ قابل محاسبه است. وقتی مقدار V_{GS}

صفر باشد، جریان گذرنده از JFET ماکزیمم و همان جریان اشباع ترانزیستور است. از رابطه جریان درین می توان دید که این جریان برابر I_{DSS} است.

پرسش ۳

در یک JFET که دارای بایاس صفر است کانال آن دارای کدام یک از وضعیت های زیر است :

الف) گرفتگی (ب) تا حدی باز (پ) کاملاً باز (ت) نامعلوم

پاسخ: وقتی ولتاژ گیت - سورس برابر صفر است بیشینه جریان از کانال می گذرد و علی رغم گسترش ناحیه تهی ناشی از ولتاژ

د- سورس، سرتاسر کانال باز است. بنابراین گزینه پ صحیح است.

آزمونک ۹

در چه ناحیه ای می توان از JFET به عنوان منبع جریان استفاده کرد؟ مقدار جریان این منبع با چه پارامتری کنترل می شود؟

پاسخ: در ناحیه اشباع، ترانزیستور به صورت یک منبع جریان ثابت عمل می کند. مقدار جریان این منبع با ولتاژ گیت - سورس

مشخص می شود.

آزمونک ۱۰

در چه صورت یک ترانزیستور اثر میدان در ناحیه اشباع کار می کند؟

پاسخ: باید مقدار ولتاژ درین - سورس ترانزیستور بیشتر از مقدار $V_{DS(r)}$ باشد که با رابطه زیر تعریف می شود :

$$V_{DS(r)} = V_P - V_{GS}$$

پرسش ۴

هدف

- سنجش دانش فراگیران در مورد مشخصات فیزیکی، نواحی کار و نوع بایاس و تأثیرات این عوامل بر یکدیگر

جربانی که در کانال یک JFET برقرار می شود به طور مستقیم از کدام یک از پارامترهای زیر تأثیر نمی پذیرد؟

الف) ولتاژ درین (ب) هدایت انتقالی (پ) ولتاژ گیت (ت) نوع بایاس گیت

پاسخ: گزینه ب پاسخ صحیح است. با توجه به منحنی مشخصه JFET، هنگامی که JFET در ناحیه خطی عمل می کند با

افزایش ولتاژ درین - سورس میزان جریان عبوری از کانال افزایش می یابد. میزان این جریان با مقدار ولتاژ گیت نیز رابطه مستقیم

دارد و با کاهش ولتاژ گیت، کاهش می یابد. همچنین نوع بایاسینگ گیت بر میزان جریان تأثیر می گذارد. در صورتی که ولتاژ گیت -

سورس صفر باشد بیشترین مقدار جریان از کانال می گذرد و با اعمال ولتاژ منفی به گیت از میزان جریان کاسته می شود.

پرسش ۵

هدایت انتقالی (g_m) در یک JFET کدام یک از نرخ های زیر است :

الف) تغییر ولتاژ درین به تغییر ولتاژ سورس (ب) تغییر جریان درین به تغییر ولتاژ گیت

پ) تغییر جریان گیت به تغییر ولتاژ سورس (ت) تغییر جریان درین به تغییر ولتاژ درین
پاسخ: پاسخ صحیح گزینه ب است. هدایت انتقالی برابر با نسبت تغییرات جریان درین به تغییرات ولتاژ گیت - سورس برای یک ولتاژ ثابت درین - سورس است.

فعالیت خارج از کلاس ۱

دانش آموزان می توانند این فعالیت را در آزمایشگاه و یا با استفاده از نرم افزارهای معرفی شده در کتاب آزمایشگاه مجازی ۲ انجام دهند. اجرای کارهای عملی پیشنهادی فقط در ساعات کارگاهی و بر مبنای کتاب کارگاه الکترونیک عمومی

WWW

معرفی سایت: معرفی JFET، طرز کار و نحوه بایاسینگ آن

۱- http://www_eng.cam.ac.uk/mmg/teaching/linearcircuits/jfet.html

در وب سایت فوق می توان با تغییر مقادیر ولتاژهای درین - سورس و گیت - سورس وضعیت کانال درین - سورس و همچنین موقعیت نقطه کار روی خط بار DC را مشاهده کرد.

۲- http://www.circuitstoday.com/fet_biasing

۳- http://www.qrp.pops.net/jfet_bias_2006.asp

✓ پاسخ به سؤالات الگوی پرسش ۳-۶ (صفحه ۷۳ از کتاب درسی)

۱-۳-۶-۱ پاسخ: ترانزیستورهای BJT عناصری کنترل شده با جریان و ترانزیستورهای FET عناصری کنترل شده با ولتاژ هستند.

۲-۳-۶-۲ پاسخ: مقاومت ورودی ترانزیستورهای BJT به علت وجود جریان ورودی زیاد نسبتاً کم است.

۳-۳-۶-۳ پاسخ: صحیح

۴-۳-۶-۴ پاسخ: صحیح

۵-۳-۶-۵ پاسخ: همانطور که از منحنی مشخصه خروجی JFET مشخص است ولتاژ پیوند گیت - سورس می تواند از صفر تا یک ولتاژ منفی تغییر کند. لذا عبارت بیان شده در این سؤال غلط است.

۶-۳-۶-۶ پاسخ: گزینه ۲ صحیح است.

۷-۳-۶-۷ پاسخ:

۱- در یک JFET نوع N در صورتی که پیوند گیت - سورس در بایاس مخالف باشد ترانزیستور هدایت می کند اما بایستی در نظر داشت که افزایش ولتاژ معکوس دو سر این پیوند محدودیت دارد و این افزایش می تواند منجر به وارد شدن ترانزیستور به ناحیه قطع بشود.

۲- در صورتی که پیوند گیت - سورس به صورت مستقیم بایاس شود ترانزیستور آسیب خواهد دید و این گزینه صحیح نیست.

۳- برای اینکه ترانزیستور در یکی از نواحی اهمی یا فعال عمل کند باید ولتاژ پیوند درین - سورس مثبت باشد. حال اگر درین به زمین متصل باشد در صورتی که سورس دارای یک ولتاژ مثبت بوده یا اینکه به زمین وصل شده باشد، ترانزیستور خاموش است.

۴- در این حالت ولتاژ پیوند گیت - سورس صفر است و در صورتی که ولتاژ درین - سورس یک مقدار مثبت کافی را داشته باشد، ترانزیستور روشن است.

۸-۶-۳- پاسخ: همانطور که در بخش ۱-۲-۳ از کتاب درسی بیان شده است در صورتی که $V_{GS} = 0$ است وقتی مقدار V_{DS} باعث بسته شدن حداکثری کانال می شود جریان درین ثابت باقی می ماند. به این مقدار از ولتاژ درین - سورس، V_p گفته می شود. بنابراین گزینه صحیح، ۳ است.

۹-۶-۳- پاسخ: از شکل ۲۱-۳ از کتاب درسی مشخص است که وقتی ولتاژ درین - سورس بین V_p و ولتاژ شکست بهمنی قرار دارد، مقدار جریان ترانزیستور ثابت است. بنابراین گزینه صحیح، ۴ است.

۱۰-۶-۳- پاسخ: طبق تعریف، I_{DSS} حداکثر جریان درین است وقتی ولتاژ پیوند گیت - سورس صفر باشد و گزینه ۴ صحیح است.

۱۱-۶-۳- پاسخ: می دانیم V_p و V_{GS0} از آنجا که V_p دارای مقدار مثبتی است می توان نتیجه گرفت $V_p < V_{GS0}$.

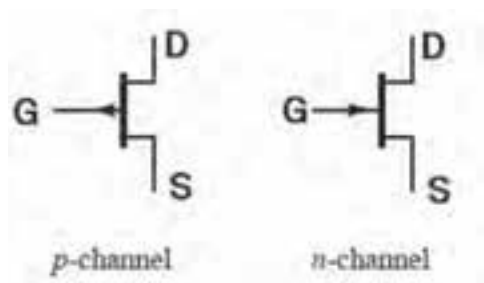
۱۲-۶-۳- پاسخ: این منحنی نشان دهنده تغییرات جریان درین نسبت به ولتاژ گیت - سورس است.

۱۳-۶-۳- پاسخ:

الف) می دانیم که شرایط بایاسینگ یک JFET نوع P، مخالف نوع N است. در یک ترانزیستور نوع N با افزایش ولتاژ معکوس پیوند گیت - سورس، ناحیه تهی از بار گسترش پیدا می کند. این شرایط در مورد یک ترانزیستور نوع P وقتی اتفاق می افتد که ولتاژ گیت - سورس دارای یک مقدار مثبت افزایشده باشد.

ب) گسترش ناحیه تهی از حامل ها باعث افزایش مقاومت کانال می شود.

۱۴-۶-۳- پاسخ:



شکل ۴-۳

۱۵-۶-۳- پاسخ: با افزایش ولتاژ V_{DD} از آنجا که سورس به زمین متصل است مقدار ولتاژ پیوند درین - سورس افزایش

می یابد. برای یک ولتاژ گیت - سورس ثابت، وقتی ولتاژ درین - سورس به قدری افزایش می یابد که جریان عبوری از کانال ثابت می شود، ترانزیستور در ناحیه اشباع عمل می کند. ولتاژ درین - سورس در این نقطه همان V_p یا قدرمطلق V_{GS0} است.

۱۶-۶-۳- پاسخ: برای مقاومت در ناحیه اهمی داریم:

$$R_{DS} = V_{DS} / I_D = 0.25V / 2 \times 10^{-6}A = 125K\Omega$$

۱۷-۶-۳- پاسخ: برای یک JFET در ناحیه اشباع داریم:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GSoff}}\right)^2$$

چون V_p است داریم: V_{GS0} با جایگذاری مقادیر داده شده در سؤال در رابطه جریان درین داریم:

$$I_D = 18mA \left(1 - \frac{-1}{-3}\right)^2 = 8mA$$

۳-۳- تغذیه JFET (صفحه ۷۴ از کتاب درسی)

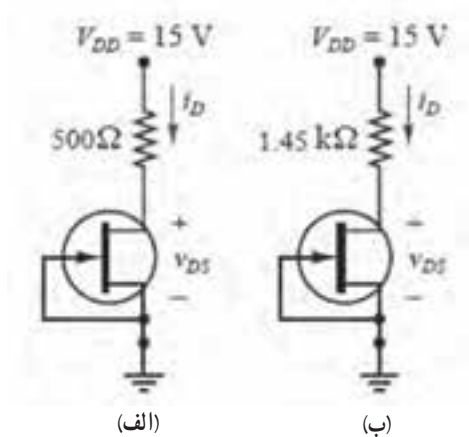
به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

آزمونک ۱۱

نقش مقاومت سورس (R_S) در مدار خود تغذیه را توضیح دهید.
پاسخ: این مقاومت با ایجاد فیدبک منفی تا حدودی موجب پایداری نقطه کار FET می شود.

مثال ۱

هدف



شکل ۳-۵

– تعیین عملی ناحیه کار ترانزیستور با استفاده از روابط

جریان و ولتاژ حاکم بر آن در نواحی مختلف با فرض $I_{DSS} = 10\text{ mA}$ و $V_P = 4\text{ V}$ ، ناحیه کار هر یک از JFET های نشان داده شده در شکل ۳-۵ را مشخص کنید.

پاسخ: در مدار الف) از آنجا که $V_{GS} = 0$ است بیشینه جریان از درین می گذرد و داریم $I_D = I_{DSS} = 10\text{ mA}$. برای تعیین نقطه کار بایستی ولتاژ درین معین شود. با نوشتن معادله KVL برای خروجی مدار داریم:

$$V_{DD} - I_D R_D - V_{DS} \rightarrow 15\text{ V} - (10\text{ mA})(500\Omega) - V_{DS} = 0 \Rightarrow V_{DS} = 10\text{ V}$$

می دانیم که شرط کارکردن ترانزیستور اثر میدان در ناحیه اشباع عبارت است از: $V_{DS} > V_{GS} - V_P$
با آزمودن این شرط برای مدار شکل الف) داریم $10 > 0 - 4$ در نتیجه ترانزیستور در ناحیه اشباع کار می کند.

در مدار ب) با نوشتن معادله KVL برای خروجی مدار داریم:

$$V_{DD} - I_D R_D - V_{DS} \rightarrow 15\text{ V} - (10\text{ mA})(1450\Omega) - V_{DS} = 0 \Rightarrow V_{DS} = -5\text{ V}$$

با آزمودن شرط فعالیت در ناحیه اشباع داریم $4 < 0 - 5$ و در نتیجه ترانزیستور در ناحیه اهمی یا خطی کار می کند.

۳-۴- موارد کاربرد ترانزیستورهای اثر میدان (صفحه ۸۲ از کتاب درسی)

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

مثال ۲

هدف

– به دست آوردن مقاومت یک FET و بررسی نقش پارامترهای تأثیرگذار در اندازه آن.
یک JFET دارای مشخصات زیر است :

$$V_P = 2V, I_{DSS} = 8mA, V_{GS} = 1V$$

مقادیر زیر را محاسبه کنید :

الف) r_{DS}

ب) مقداری از V_{GS} که در آن r_{DS} نصف مقدار محاسبه شده در قسمت الف را داراست.

پاسخ : با توجه به رابطه بیان شده در بخش ۲-۸-۳ از کتاب درسی برای مقاومت درین – سورس می توان نوشت :

$$r_{DS} = \frac{V_P}{1 - \left| \frac{V_{GS}}{V_P} \right|} \frac{2I_{DSS}}{V_P}$$

الف) بنابراین برای محاسبه r_{DS} داریم :

$$r_{DS} = \frac{2V}{1 - (1/2)} \frac{(2 \times 8mA)}{1/2} = 1000 / 8 = 250 \Omega$$

ب) باید مقداری از V_{GS} محاسبه شود که در آن $r_{DS} = 125 \Omega$ شود :

$$125 = \frac{2V}{1 - \left(\frac{V_{GS}}{2} \right)} \frac{(2 \times 8mA)}{1/2} \rightarrow 1 - \left(\frac{V_{GS}}{2} \right) = \frac{(1000)}{125} = 8 \rightarrow V_{GS} = 0$$

$$\rightarrow V_{GS} = 0$$

۳-۴-۱- استفاده از JFET به عنوان منبع جریان : به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

۳-۴-۲- استفاده از JFET به عنوان حافظه (این مبحث جهت دانش افزایی است). به لوح فشرده ضمیمه کتاب

مراجعه کنید.

مثال ۳ : دانش افزایی

هدف

– آشنایی با یک منبع جریان ساده ساخته شده از ترانزیستور اثر میدان

– استفاده از روابط جریان و ولتاژ ترانزیستور

– تعیین مقدار مناسب از ولتاژ گیت – سورس و جریان درین برای کار

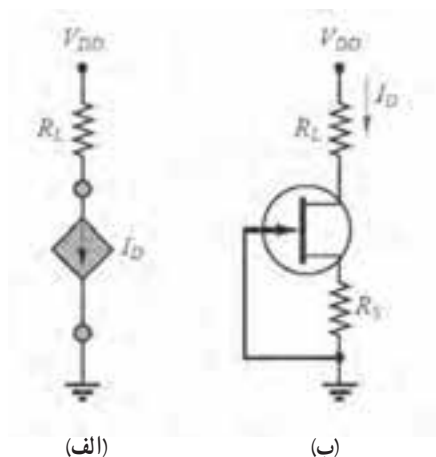
کردن ترانزیستور در ناحیه اشباع

توضیح دهید که چرا مدار نشان داده شده در شکل ۳-۸-۳ الف را می توان

با مدار شکل ۳-۸-۳ ب مدل کرد.

مشخصات مدار عبارت است از :

$$V_P = 3V, I_{DSS} = 6mA, R_S = 1K\Omega, R_L = 10K\Omega, V_{DD} = 20V$$



شکل ۳-۸

پاسخ : با نوشتن معادله KVL در حلقه گیت - سورس به دست می آید :

$$V_{GS} = R_S I_D$$

با نوشتن رابطه جریان JFET در ناحیه اشباع و جایگذاری V_{GS} داریم :

$$I_D = I_{DSS} \left(1 + \frac{V_{GS}}{V_{GSoff}}\right)^2 = I_{DSS} \left(1 + \frac{-R_S I_D}{V_{GSoff}}\right)^2$$

با گسترش معادله فوق خواهیم داشت :

$$\frac{I_{DSS}}{V_{GSoff}^2} R_S^2 I_D^2 + (-1 + \frac{I_{DSS} R_S}{V_{GSoff}}) I_D + I_{DSS} = 0$$

با حل معادله فوق برای جریان درین به دست می آید :

$$I_D = 6^{mA}, I_D = 1/5^{mA}$$

برای اینکه ترانزیستور در ناحیه اشباع و به عنوان یک منبع جریان کار کند باید شرط $V_{DS} \geq V_{GS} - V_P$ برآورده شود. برقراری این شرط به ازای هر یک از مقادیر محاسبه شده برای جریان درین آزمایش می شود. برای $I_D = 6^{mA}$:

$$V_{DS} = V_D - V_S = (V_{DD} - R_L I_D) - R_S I_D$$

$$\Rightarrow V_{DS} = (20V - 10k\Omega \times 6^{mA}) - 1k\Omega \times 6^{mA} = 46V$$

$$46 < 60$$

$$V_{DS} = (20V - 10k\Omega \times 1/5^{mA}) - 1k\Omega \times 1/5^{mA} = 5V - 1/5V = 3/5V$$

در این حالت $V_{GS} = 6V$ و شرط فعالیت در حالت اشباع برآورده نخواهد شد زیرا :

$$I_D = 1/5^{mA}$$

در این حالت $V_{GS} = 1/5V$ و برای شرط فعالیت در حالت اشباع داریم :

$$3/5 > (1/5 - 30)$$

بنابراین در حالت دوم شرط اشباع برآورده شده است و مدار مانند یک منبع جریان عمل می کند.

۳-۴-۳- استفاده از JFET به عنوان تشخیص دهنده میدان الکتریکی : به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

۳-۵- تقویت کننده های سیگنال کوچک FET

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

پرسش ۶ : کدام یک از آرایش های زیر ولتاژ خروجی تولید می کند که 180° درجه با ورودی اختلاف فاز دارد؟

(الف) سورس مشترک (ب) درین مشترک (پ) گیت مشترک (ت) همه موارد

پاسخ : پاسخ صحیح گزینه الف است.

پرسش ۷ : کدام یک از مدارهای زیر دارای بیشترین بهره است؟

(الف) سورس مشترک (ب) درین مشترک

(پ) گیت مشترک (ت) تنها به بایاس بستگی دارد و مهم نیست که کدام پایانه زمین شده است.

پاسخ : پاسخ صحیح گزینه الف است.

۳-۶- مقایسه تقویت کننده های BJT و FET (صفحه ۸۵ کتاب درسی)

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

✓ پاسخ به سؤالات الگوی پرسش ۱۰-۳ (صفحه ۸۶ از کتاب درسی)

۱-۱۰-۳ پاسخ: در صورتی که JFET در ناحیه اشباع کار کند برای محاسبه I_D می توان از فرمول $I_D = I_{DSS} (1 - \frac{V_{GS}}{V_{GSoff}})^2$ استفاده کرد.

۲-۱۰-۳ پاسخ: مدار شکل ۳-۵۳ (کتاب درسی) به صورت سرخود یا خودتغذیه بایاس شده است و V_{GS} از رابطه $I_D = 33 \text{ mA}$ $R_S I_D$ V_{GS} به دست می آید.

۳-۱۰-۳ پاسخ: صحیح

۴-۱۰-۳ پاسخ: صحیح

۵-۱۰-۳ پاسخ: برای اینکه ترانزیستور در ناحیه اشباع عمل کند بایستی مقدار V_{DS} آن بزرگ تر یا مساوی $V_{DS(r)}$ باشد که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$V_{DS(r)} \quad V_P \quad V_{GS} \quad 6 \quad 2 \quad 4^V \rightarrow V_{DS} \geq 4^V$$

در نتیجه گزینه ۱ صحیح است.

۶-۱۰-۳ پاسخ: طبق مطالب گفته شده در بخش ۱-۸-۳ از کتاب درسی و شکل ۳-۴۵ کتاب، مدار داده شده در این سؤال یک منبع جریان ثابت است و گزینه ۳ صحیح است.

۷-۱۰-۳ پاسخ: با نوشتن KVL در حلقه ورودی داریم:

$$V_{GS} \quad 50 \text{ mV} \quad I_D$$

برای یافتن ولتاژ گیت - سورس بایستی مقدار جریان درین را محاسبه کرد. به این منظور معادله KVL حلقه خروجی را می نویسیم:

$$V_{DD} \quad 5/3 \text{ K}\Omega \quad I_D \quad 4^V \quad 50 \text{ mV} \quad I_D \rightarrow 12^V \quad I_D (4 \text{ K}\Omega) \quad 4^V \rightarrow I_D \quad 2 \text{ mA}$$

$$\rightarrow V_{GS} \quad 50 \text{ mV} \quad I_D \quad 50 \text{ mV} (2 \text{ mA}) \quad 1^V$$

و گزینه ۳ پاسخ صحیح است.

۸-۱۰-۳ پاسخ: برای جریان درین در ناحیه اشباع داریم:

$$I_D = I_{DSS} (1 - \frac{V_{GS}}{V_{GSoff}})^2$$

از این رابطه می توان مقدار I_{DSS} را یافت. اما پیش از این باید از کار کردن JFET در ناحیه اشباع اطمینان حاصل کرد. بدین منظور درستی رابطه $V_{DS} \geq V_{DS(r)}$ را بررسی می کنیم.

$$V_{DS(r)} \quad V_P \quad V_{GS} \quad 4^V \quad V_{GS}$$

از آنجا که هیچ جریانی از پیوند گیت - سورس نمی گذرد و سورس به زمین متصل است مقدار ولتاژ پیوند گیت سورس برابر مقدار ولتاژ منبع تغذیه متصل به گیت است و داریم:

$$V_{GS} \quad 2^V$$

$$V_{DS(r)} \quad 4^V \quad 2^V \quad 2^V \text{ در نتیجه}$$

برای پیدا کردن مقدار ولتاژ درین - سورس باید معادله KVL حلقه خروجی را نوشت :

$$V_{DS} = V_{DD} - 1\text{K}\Omega I_D \quad 20 \quad 4 \quad 16^V$$

از آنجا که $V_{DS} \geq V_{DS(r)}$ پس JFET در ناحیه اشباع عمل می کند و می توان از رابطه جریان درین در ناحیه اشباع برای محاسبه

$$4^{\text{mA}} = I_{DSS} \left[1 - \left(\frac{-2}{-4} \right) \right]^2 \rightarrow I_{DSS} = 16^{\text{mA}} \quad \text{استفاده کرد: } I_{DSS}$$

و گزینه ۳ صحیح است.

۹-۱۰-۳- پاسخ: در مدار a از مقاومت متصل به گیت جریانی نمی گذرد و ولتاژ گیت - سورس تنها با استفاده از ولتاژ

سورس محاسبه می شود :

$$V_{GS} = V_S = 1\text{K}\Omega I_D = 1^V$$

با نوشتن KVL در حلقه خروجی مقدار ولتاژ درین - سورس محاسبه می شود :

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (4/7 \quad 1)\text{K}\Omega = 12 \quad 5/7 \quad 6/3^V$$

برای مدار b نیز شرایطی مشابه مدار a وجود دارد با این تفاوت که مقدار جریان درین و مقاومت های مدار متفاوت است :

$$V_{GS} = V_S = 100\Omega I_D = 50\text{mV}$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (470 \quad 100)\Omega = 9 \quad 2/85 \quad 6/15^V$$

تفاوت مدار c با دو مدار قبلی در این است که JFET به کار گرفته شده در آن از نوع p است و جهت جریان خروجی از سورس

به طرف درین است و داریم :

$$V_{GS} = V_S = 470\Omega (I_D) = 1/41^V$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (0/47 \quad 2/2)\text{K}\Omega = 15 \quad 2/67 (3^{\text{mA}}) \quad 6/99^V \sim 7^V$$

۱۰-۱۰-۳- پاسخ: برای یافتن نقطه کار ترانزیستور به دو مطلب بایستی توجه کرد. اول بایستی شرط هدایت ترانزیستور را

بررسی کرد که عبارت است از $V_{GS} > V_{GS(o)}$. در مرحله دوم باید شرط کار کردن JFET در ناحیه اشباع یعنی $V_{GS} \geq V_P$ را

بررسی کرد و سپس ناحیه کار ترانزیستور را مشخص کرد. از آنجا که در ترانزیستورهای JFET مقدار قدر مطلق ولتاژ بحرانی تقریباً

با ولتاژ آستانه برابر است در نظر می گیریم: $V_P = V_{GS(o)} = 3^V$

الف) از آنجا که $V_{GS} > V_{GS(o)}$ ($2 > 3$) ترانزیستور هدایت می کند و چون V_{DS} از $V_{DS(r)}$ بزرگ تر است ($12 > 2 \quad 3$)

پس ترانزیستور در ناحیه اشباع کار می کند.

ب) در این حالت شرط هدایت ترانزیستور برآورده می شود اما چون V_{DS} از $V_{DS(r)}$ کوچک تر است ($1 < 1 \quad 3$) پس

ترانزیستور در ناحیه اهمی کار می کند.

پ) در این حالت چون $V_{GS} < V_{GS(o)}$ ترانزیستور قطع است.

ت) با توجه به مقدار ولتاژ درین - سورس و با در نظر گرفتن ناحیه کار خطی ترانزیستور می توان گفت که JFET در ناحیه

اشباع کار می کند.

۱۱-۱۰-۳- پاسخ: چون $V_{GS} = 0$ است، مقدار جریان درین ماکزیمم و برابر I_{DSS} است. برای V_{DS} می توان نوشت :

$$V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D = 12 - (1 \text{ mA} \times 1 \text{ k}\Omega) = 4 \text{ V}$$

در نتیجه توان تلف شده در ترانزیستور برابر است با :

$$P_Q = I_D \times V_{DS} = 1 \text{ mA} \times 4 \text{ V} = 4 \text{ mW}$$

۱۲-۱۰-۳ پاسخ : ابتدا باید در نظر داشت که چون ترانزیستور از نوع کانال n است مقدار V_{GS} در حالت هدایت منفی

است و داریم $V_{GS} = 3 \text{ V}$.

الف) ولتاژ گیت با تقسیم ولتاژ منبع تغذیه DC بین مقاومت های R_1 و R_2 به دست می آید :

$$V_G = V_{DD} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) = 10 \left(\frac{200}{200 + 200} \right) = 5 \text{ V}$$

$$V_S = R_S I_D$$

و برای ولتاژ سورس داریم :

از آنجا که مقادیر ولتاژهای V_G و V_S مشخص اند، برای تعیین مقاومت R_S باید مقدار جریان درین را محاسبه کرد. فرض

می کنیم ترانزیستور در ناحیه اشباع کار می کند :

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2 = 10 \text{ mA} \left(1 - \frac{3}{5} \right)^2 = 1.6 \text{ mA}$$

برای V_{GS} می توان نوشت :

$$V_{GS} = V_G - V_S \rightarrow 3 - 1 = 1.6 \text{ mA} R_S \rightarrow R_S = 2/5 \text{ k}\Omega$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D - I_D R_S = 10 - 2/2 - 4 = 2/8 \text{ V}$$

ب) چون $V_{DS} > V_{DS(r)}$ است و داریم $V_{DS(r)} = 3.5 \text{ V}$ پس فرض کارکردن ترانزیستور در ناحیه اشباع صحیح است.

۱۳-۱۰-۳ پاسخ : معادله خط بار عبارت است از :

$$V_{GS} = R_S I_D$$

با مشخص کردن دو نقطه از این خط و پیدا کردن محل تلاقی آن با منحنی مشخصه انتقالی می توان مشخصات نقطه کار را

پیدا کرد :

$$\text{نقطه اول : } I_D = 0 \leftarrow V_{GS} = 0$$

$$\text{نقطه دوم : } I_D = I_{DSS} = 10 \text{ mA} \leftarrow V_{GS} = R_S I_{DSS} = 0.33 \text{ k}\Omega (5 \text{ mA})$$

۱۴-۱۰-۳ پاسخ : در این تقویت کننده ورودی به گیت اعمال شده و خروجی از درین گرفته شده است. بنابراین آرایش

آن سورس - مشترک است.

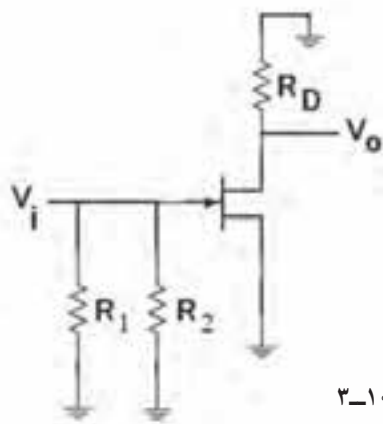
مدل AC : برای رسم این مدل بایستی خازن های مدار را اتصال کوتاه در نظر

گرفت و منبع تغذیه DC را به زمین متصل کرد. مدار حاصل در شکل ۱۰-۳ نشان

داده شده است.

می دانیم که ویژگی های تقویت کننده سورس - مشترک شبیه تقویت کننده

امیتر - مشترک است. بنابراین این تقویت کننده جریان و ولتاژ را تقویت می کند.



شکل ۱۰-۳

۳-۷- ترانزیستور اثر میدان با گیت عایق شده یا IGFET (صفحه ۸۸ از کتاب درسی)

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

آزمونک ۱۲

چرا JFET نسبت به تغییرات حرارت ناپایدار است و افزایش درجه حرارت چه تأثیری بر آن می‌گذارد؟
پاسخ: وابستگی مقدار جریان نشتی پیوند گیت - سورس به درجه حرارت باعث ناپایداری JFET شده و مقدار مقاومت آن با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد.

آزمونک ۱۳

چرا MOSFET دارای مقاومت ورودی بالا است؟
پاسخ: از آنجا که در یک MOSFET، گیت با یک لایه اکسید سیلیکون از کانال جدا شده است و در نتیجه هیچ جریانی از آن عبور نمی‌کند، این ترانزیستور دارای مقاومت ورودی بالایی است.

آزمونک ۱۴

در MOSFET با کانال نهمی شونده اگر پیوند گیت - سورس به صورت مستقیم بایاس شود چه اتفاقی می‌افتد؟
پاسخ: در ترانزیستور JFET بایاس کردن پیوند گیت - سورس به صورت مستقیم ممکن است منجر به سوختن ترانزیستور شود. اما در یک ترانزیستور MOSFET پیوند گیت - سورس می‌تواند در گرانش مستقیم نیز قرار بگیرد و این امر موجب افزایش جریان درین خواهد شد. علت این است که در این حالت تعدادی الکترون از نواحی n به درون کانال جذب می‌شوند و مقاومت کانال کاهش می‌یابد.

آزمونک ۱۵

در MOSFET با کانال تشکیل شونده چرا باید گیت ترانزیستور را حتماً بایاس کرد؟
پاسخ: از آنجا که در این ترانزیستور کانال را در هنگام ساخت ایجاد نمی‌کنند برای استفاده از آن در حالت روشن، باید گیت آن را بایاس کرد.

مثال ۴ (کاربردی) دانش افزایی

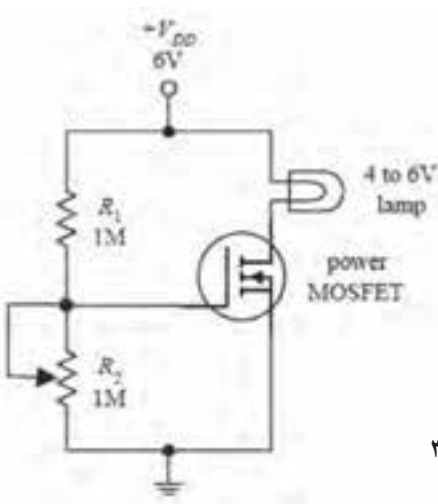
هدف

- آشنایی با کاربرد عملی یکی از روش‌های بایاسینگ
- استفاده از دانسته‌های دانش‌آموزان در مورد تأثیر بایاسینگ بر

مقدار جریان خروجی ترانزیستور

شکل ۱۱-۳ یک دیمر را نشان می‌دهد که با استفاده از یک

MOSFET قدرت از نوع تشکیل شونده، ساخته شده است.



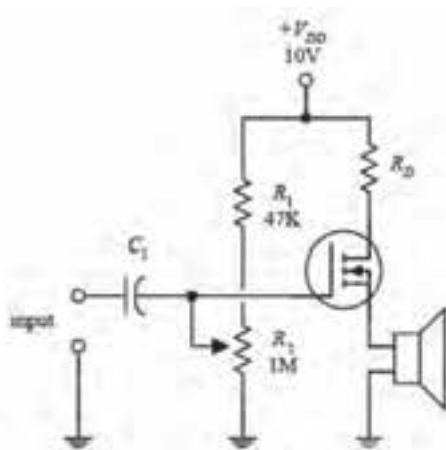
شکل ۱۱-۳

ابتدا می‌توان در مورد دیمر و کاربردهای آن صحبت کرد. سپس از دانش‌آموزان خواست تا در مورد علت استفاده از MOSFET در این مدار فکر کرده و با یکدیگر به بحث بپردازند. می‌توان از آن‌ها خواست تا در مورد نوع تغذیه MOSFET و کاربرد مقاومت R_p با یکدیگر به تبادل نظر بپردازند و تأثیر تغییر در میزان این مقاومت بر میزان جریان درین را بررسی کنند.

پاسخ: همانطور که از شکل مشخص است از راهکار تقسیم ولتاژ برای تغذیه MOSFET استفاده شده است (دقت شود که در این مدار از مقاومت سورس استفاده نشده است). نقش مقاومت متغیر R_p تنظیم ولتاژ گیت – سورس است که از طریق آن می‌توان جریان گذرنده از درین و شدت روشنایی لامپ را کنترل کرد. با تغییر در اندازه مقاومت R_p میزان ولتاژ گیت – سورس تغییر می‌کند و این تغییر ولتاژ می‌تواند دامنه جریان خروجی ترانزیستور را تحت تأثیر قرار دهد.

مثال ۵ (کاربردی)

هدف ☒



شکل ۳-۱۲ مدار یک تقویت‌کننده صوتی با استفاده از تغذیه مستقیم ولتاژ و MOSFET تشکیل شونده

– بررسی کاربرد عملی یکی از آرایش‌های تقویت کننده و نقش قطعات مختلف استفاده شده در آن

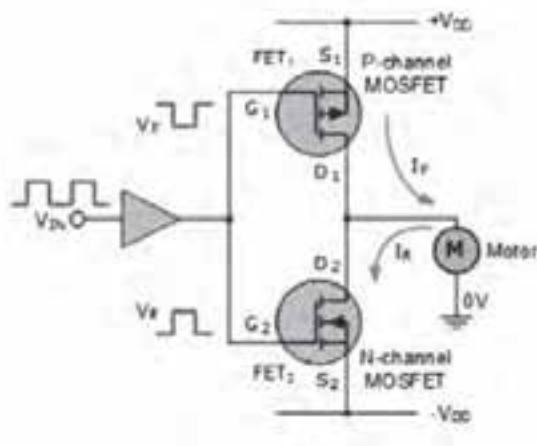
شکل ۳-۱۲ مدار یک تقویت کننده صوتی را نشان می‌دهد که با استفاده از یک MOSFET تشکیل شونده نوع n ساخته شده است.

از دانش‌آموزان خواسته شود تا در مورد نوع مدار تغذیه، نوع آرایش تقویت کننده، نقش مقاومت متغیر R_p ، نحوه تقویت سیگنال و کاربرد خازن در مدار به بحث بپردازند.

پاسخ: در این مدار از مدار مقسم ولتاژ برای تغذیه MOSFET استفاده شده است. سیگنال صوتی ورودی توسط خازن به گیت داده می‌شود و C_1 ، به عنوان خازن کوپلاژ عمل می‌کند. این سیگنال پس از تقویت توسط MOSFET به بلندگو داده می‌شود که به پایه سورس ترانزیستور متصل است. پس ترانزیستور اثر میدان در آرایش درین مشترک یا سورس پیرو به کار گرفته شده است. مقاومت متغیر R_p بهره مدار تقویت کننده و دامنه سیگنال صوتی را از طریق تغییر جریان درین کنترل می‌کند.

CMOS ۱-۷-۳

مثال ۶ (کاربردی)



شکل ۳-۱۳

در مدار شکل ۳-۱۳ از یک CMOS برای کنترل یک موتور DC استفاده شده است. توضیح دهید که به ازای ولتاژهای مثبت و منفی عملکرد مدار چگونه است.

پاسخ: همانطور که از شکل مدار مشخص است، CMOS از دو MOSFET تشکیل شده است که یکی از آن‌ها از نوع N و دیگری از نوع P است. به خاطر ساختار CMOS می‌توان از آن به عنوان یک کلید دوجته استفاده کرد. در مدار نشان داده شده از یک سیگنال پالس به عنوان ورودی استفاده شده است که از طریق یک بافر به بیس MOSFET ها وصل شده است. وقتی که سیگنال دارای سطح پایین است MOSFET نوع P روشن است. سورس این MOSFET به V_{DD} متصل است و ولتاژ گیت - سورس منفی این ترانزیستور باعث روشن شدن آن می‌شود. از این جهت ولتاژ منبع تغذیه V_{DD} باعث روشن شدن موتور و چرخش آن در جهت موافق می‌شود. وقتی سطح بالای سیگنال ورودی به ترانزیستورها اعمال می‌شود، ترانزیستور دوم که از نوع N است روشن می‌شود و ترانزیستور نوع P خاموش است. علت روشن شدن ترانزیستور ۲ این است که سورس آن به منبع تغذیه منفی متصل و در نتیجه ولتاژ گیت - سورس آن مثبت است. در این حالت ولتاژ منفی منبع تغذیه به موتور اعمال می‌شود و چون جریان از درین به طرف سورس جاری می‌شود، جهت جریان عبوری از موتور عکس حالت قبل و موتور در جهت مخالف خواهد چرخید. به روش‌های مختلفی می‌توان از دو MOSFET این مدار برای راه اندازی موتور استفاده کرد. جدول ۳ وضعیت‌های ممکن برای MOSFET ها و عملکرد متناظر موتور را خلاصه کرده است.

جدول ۳

عملکرد موتور	MOSFET ۲	MOSFET ۱
موتور خاموش است	OFF	OFF
موتور در جهت موافق می‌چرخد	OFF	ON
موتور در جهت مخالف می‌چرخد	ON	OFF
وضعیت تعریف نشده	ON	ON

WWW

معرفی سایت: معرفی ترانزیستورهای MOSFET

۱- http://www.play_hookey.com/semiconductors/enhancement_mode_mosfet.html

۲- http://www.play_hookey.com/semiconductors/depletion_mode_mosfet.html

۳- http://www.electronics_tutorials.ws/transistor/tran_7.html

۴- http://www.powerdesignersusa.com/InfoWeb/design_center/articles/MOSFETs/mosfets.shtml

✓ پاسخ به سؤالات الگوی پرسش ۱۸-۳ (صفحه ۹۴ از کتاب درسی)

۱-۱۸-۳ پاسخ: Depletion به مفهوم تهی‌شونده و Enhancement به مفهوم تشکیل‌شونده یا بهبودیافته است.

۲-۱۸-۳ پاسخ: در EMOSFET ها تا V_{GS} به اندازه ولتاژ آستانه روشن شدن ترانزیستور $(V_{GS(th)})$ نشود،

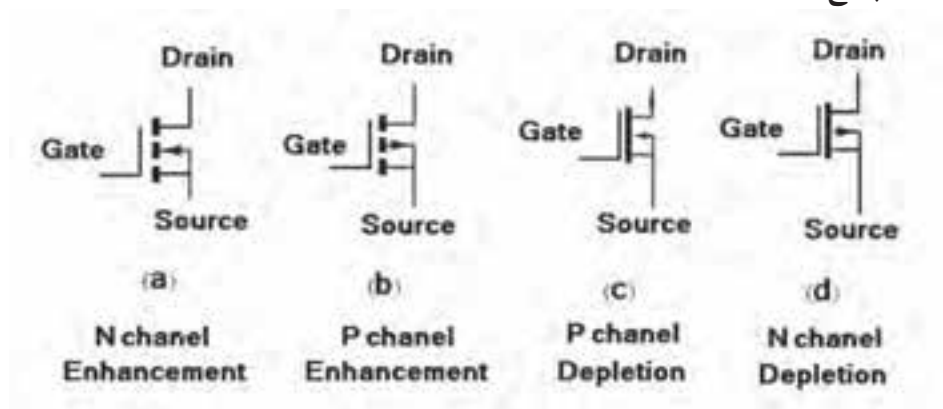
جریان درین (I_D) در مدار برقرار نمی‌شود.

۳-۱۸-۳ پاسخ: صحیح

۳-۱۸-۴ پاسخ: از آنجا بین درین و سورس کانالی وجود ندارد پس MOSFET از نوع تشکیل شونده است. چون بلور پایه از نوع P است و کانال از نوع N، MOSFET از نوع N و گزینه ۴ صحیح است.

۳-۱۸-۵ پاسخ: گزینه ۴ صحیح است.

۳-۱۸-۶ پاسخ:



شکل ۱۴-۳

۳-۱۸-۷ پاسخ: بخش ۱۴-۳ از کتاب درسی به طور کامل عملکرد EMOSFET به عنوان سوئیچ را توضیح داده است.

موضوعات پیشنهادی برای تحقیق و ارائه آن به صورت سمینار

۱- مدار بافر با امپدانس بالا با استفاده از ترانزیستور اثر میدان

۲- تقویت کننده صوتی با استفاده از ترانزیستورهای اثر میدان

۳- مدار میکسر با استفاده از ترانزیستور اثر میدان

* دانش آموزان برای انجام این تحقیق می توانند از وب سایت های متنوعی که در این زمینه در اینترنت وجود دارد استفاده

کنند. چند نمونه از این وب سایت ها در ادامه آمده اند:

http://simple_circuit.blogspot.com/2009/11/simple_audio_mixer_using_fet.html

http://www.radio_electronics.com/info/rf_technology_design/mixers/fet_mixers.php

http://www.electroniccircuits.com/electronic_circuits/fet_audio_mixer_and_switch_circuit_diagram

۴- مدار مولد سیگنال با استفاده از ترانزیستور اثر میدان

موضوعات پیشنهادی برای تحقیق و ارائه آن به صورت سمینار در لوح فشرده ضمیمه کتاب آمده است.

اجرای نرم افزار

برای اجرای دقیق آموزش و عمق دادن به مفاهیم تشریح شده لازم است کلیه فرآیندهای آموزش که با استفاده از نرم افزار مولتی سیم قابل اجرا است را از قبل اجرا کنید و آن را برای هنرجویان در کلاس به نمایش درآورید، همچنین از آنان بخواهید که در خارج از ساعات کلاسی به اجرای موارد مطرح شده به صورت نرم افزاری بپردازند. اشاره‌ای هم داشته باشید به کتاب کارگاه الکترونیک عمومی که در آن اجرای عملی و نرم‌افزاری توصیه شده است. در کتاب آزمایشگاه مجازی جلد ۲ با کد ۴۶۶/۶ تمام مراحل اجرا شده و فایل‌های اجرا شده در لوح فشرده در ضمیمه کتاب وجود دارد.