

کتاب الکترونیک ۱ و ۲ پارسه

تهیه شده در الکترونیک باز | مرجع دانلود الکترونیک

www.gselectronic.ir

تهیه و تنظیم: صادق حدیری فراهانی

Sadegh.heidari.farahani@gmail.com

فصل چهارم

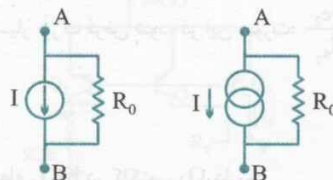
فصل ۴ منابع جریان مستقل

مقدمه

منابع جریان که از ترانزیستورهای BJT یا FET ها ساخته می‌شوند، به عنوان مدار بایاس کننده و همچنین به عنوان بار فعال در تقویت‌کننده‌ها و ایجاد ولتاژ و جریان مرجع به کار می‌روند. منابع جریان به صورت یک ترانزیستوری و یا چند ترانزیستوری طرح شده است و در مدارات مجتمع در گستره وسیعی به کار می‌روند و برحسب دقتی که باید داشته باشند، به صورت ساده و یا پیچیده طراحی می‌شوند.

۱-۴ ویژگی‌های عمومی منابع جریان

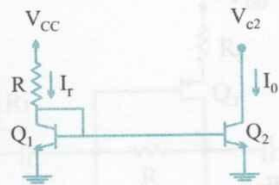
در شکل (۴-۱) منبع جریانی با جریان‌دهی I و مقاومت داخلی R_0 نشان داده شده است.



شکل ۴-۱ نماد منبع جریان

در یک منبع جریان ایده‌آل، جریان I باید مستقل از تمام متغیرها باشد و همچنین وابسته به پتانسیل AB نباشد، در حالت ایده‌آل مقاومت داخلی $R_0 = \infty$ دارد. در عمل منابع جریان با حالت ایده‌آل فاصله زیادی دارند. ساختمان غیر ایده‌آل ترانزیستورها و محدود بودن ولتاژ اری و عدم انطباق ترانزیستورهای به کار گرفته شده و حساسیت دمایی ترانزیستورها و مقاومت‌ها و عدم تثبیت ولتاژ تغذیه از عوامل غیر ایده‌آل بودن منابع جریان هستند.

۲-۴ منبع جریان آینه‌ای (آینه جریان) ساده با BJT



شکل ۲-۴ آینه جریان ساده

در شکل (۲-۴) یک آینه جریان ساده با ترانزیستور BJT نشان داده شده است.

ترانزیستور Q_1 به صورت اتصال دیودی و فعال است. ترانزیستور Q_2 باید در حالت فعال قرار داشته باشد؛ یعنی $V_{CE2} > V_{CE(sat)}$ باشد:

در این صورت برای ترانزیستورها می‌توان روابط جریان را نوشت. بیس‌ها و امیترها به یکدیگر وصل شده‌اند؛ بنابراین $V_{BE1} = V_{BE2}$ است:

$$I_{C1} = I_{S1} e^{\frac{V_{BE1}}{V_T}} \left(1 + \frac{V_{CE1}}{V_{A1}} \right) \quad (۱-۴)$$

$$I_{C2} = I_{S2} e^{\frac{V_{BE2}}{V_T}} \left(1 + \frac{V_{CE2}}{V_{A2}} \right) \quad (۲-۴)$$

$$\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{I_{S1}}{I_{S2}} \cdot \frac{\left(1 + \frac{V_{CE1}}{V_{A1}} \right)}{\left(1 + \frac{V_{CE2}}{V_{A2}} \right)} \quad (۳-۴)$$

اگر V_A بسیار بزرگ فرض شود، در این صورت: $(V_{BE1} = V_{BE2}), V_T L_n \frac{I_{C1}}{I_{S1}} = V_T L_n \frac{I_{C2}}{I_{S2}} \Rightarrow$

$$\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{I_{S1}}{I_{S2}} \quad (۴-۴)$$

با نوشتن رابطه KCL در کلکتور Q_1 داریم:

$$I_r = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = I_{C1} + \frac{I_{C1}}{\beta_1} + \frac{I_{C2}}{\beta_2} \quad (۵-۴)$$

با جانشین کردن (۴-۴) در (۵-۴) و فرض ترانزیستورهای کاملاً مشابه داریم:

$$I_{C2} = I_o = I_r \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}} = I_r \frac{\beta}{2 + \beta} \quad (۶-۴)$$

$$I_r = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R} \quad (۷-۴)$$

$$I_r = \frac{V_{CC} - V_{T L n} \frac{I_{C1}}{I_{S1}}}{R} \quad (۸-۴)$$

مثال ۱: در مدار شکل (۳-۴) با فرض $V_{BE}=0.7$ ، $\beta=40$ ، جریان کلکتورهای T_1, T_2, T_3 را حساب کنید. ولتاژ کلکتورهای T_1, T_2, T_3 این ترانزیستورها را در حالت فعال قرار داده است. ترانزیستورها مشابه هستند.



شکل ۴-۴

حل:

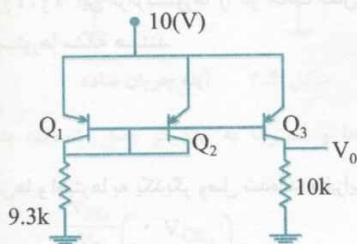
$$I_O = I_{C_2} + I_{C_3} = 0.75 \text{ mA}$$

اگر $V_{CE(sat)} = 0.2$ ولت فرض شود، حداکثر ولتاژ وصل شده به کلکتورهای Q_2 و Q_3 می تواند 9.8 ولت باشد. اگر V_A برای ترانزیستورها 100 ولت فرض شوند، آن گاه:

$$R_0 = r_{ce2} \parallel r_{ce3} = \frac{100V}{0.5mA} \parallel \frac{100V}{0.25mA} \approx 133K$$

مثال ۳: در مدار شکل (۵-۴) با فرض β بزرگ و ترانزیستورهای مشابه V_0 را به دست آورید.

حل:



شکل ۵-۴

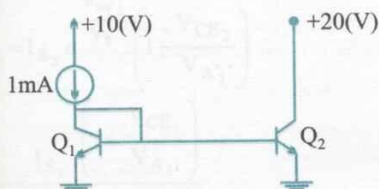
$$I_r = \frac{10 - 0.7}{9.3k} = 1mA$$

$$I_B = 0$$

$$I_{C1} + I_{C2} = I_r \Rightarrow I_{C1} = I_{C2} = 0.5mA$$

$$I_{C3} = I_{C1} = I_{C2} = 0.5mA$$

$$V_0 = 5V$$



شکل ۶-۴

مثال ۴: در مدار شکل (۶-۴) با فرض $V_A = 100$ ولت و

$V_{BE} = 0.7$ ولت و β بزرگ، I_S های برابر، جریان

کلکتور Q_2 را مشخص کنید.

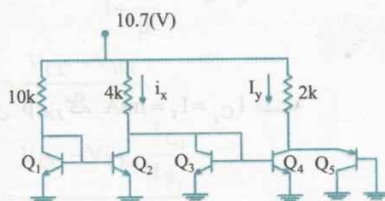
حل:

$$\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \left(1 + \frac{V_{CE1}}{V_A} \right)}{I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \left(1 + \frac{V_{CE2}}{V_A} \right)}$$

$$\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{1 + \frac{0.7}{100}}{1 + \frac{20}{100}}$$

$$I_{C2} = 1.2mA$$

دید می شود که به سبب اثر ولتاژ اری، جریان های Q_2 و Q_1 برابر نیستند.



شکل ۷-۴

مثال ۵: در مدار شکل (۷-۴) با فرض β بزرگ و

ترانزیستورهای مشابه جریان کلکتور Q_5 را مشخص کنید.

$$I_1 = \frac{10.7 - 0.7}{10k} = 1mA \Rightarrow I_1 = I_2 = 1mA$$

$$V_{C_3} = 0.7 \Rightarrow I_x = I_{C_2} + I_{C_3} = \frac{10.7 - 0.7}{4k} = 2.5mA \Rightarrow I_{C_3} = 1.5mA$$

$$I_{C_4} = 1.5mA$$

$$I_y = I_{C_4} + I_{C_5} = \frac{10.7 - V_{BE_5}}{2k} = 5mA \Rightarrow I_5 = 3.5mA$$

مثال ۶: در مدار شکل (۸-۴) جریان کلکتور Q_1 و Q_3 را تعیین کنید.

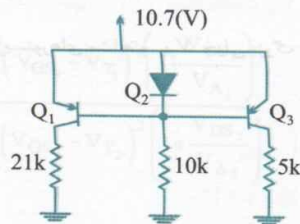
(β بزرگ و $V_{BE} = V_D = 0.7$ ، $V_{CE(sat)} = 0.2$).

حل: Q_1 و Q_2 آینه جریان هستند.

$$I_2 = I_D = \frac{10.7 - 0.7}{10k} = 1mA$$

Q_2 و Q_3 آینه جریان هستند.

$$I_3 = I_2 = 1mA$$



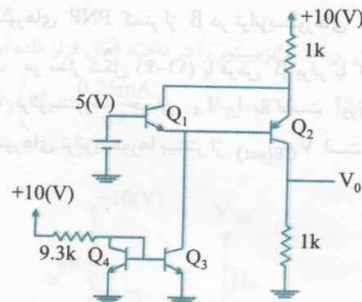
شکل ۸-۴

$$V_{C_1} = 21V$$

$$V_{E_1} = 10.7 \Rightarrow V_{C_1} = 10.5 \Rightarrow I_{C_1} = \frac{10.5}{21k} = 0.5mA$$

ترانزیستور Q_3 فعال است؛ زیرا $V_{C_3} = 5V$ است.

مثال ۷: در مدار شکل (۹-۴) با فرض β بزرگ، V_o را حساب کنید.



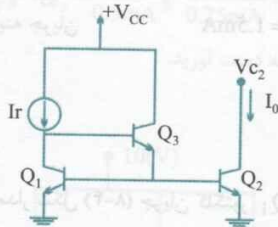
شکل ۹-۴

$$I_3 = I_4 = \frac{10 - 0.7}{9.3k} = 1mA$$

$$V_{B_1} = 5 \Rightarrow V_{E_1} = 5 - V_{BE} \Rightarrow V_{E_2} = 5$$

$$I_{C1} + I_{E2} = \frac{10 - 5}{1k} = 5mA$$

$$I_{C2} = 4mA \Rightarrow V_{O2} = 4V$$



شکل ۱۰-۴

در آینه جریان ساده شکل (۲-۴) جریان خروجی طبق رابطه

$$I_{O2} = I_r \frac{\beta}{2 + \beta} \quad (۶-۴)$$

خروجی I_{O2} به تغییرات β می‌توان از مدار شکل (۱۰-۴) استفاده کرد و به‌جای اتصال کوتاه بین کلکتور و بیس Q_1 ، Q_3 وصل شود.

با فرض ترانزیستورهای مشابه و V_A خیلی بزرگ داریم:

$$(۹-۴)$$

$$(۱۰-۴)$$

$$(۱۱-۴)$$

$$(۱۲-۴)$$

$$(۱۳-۴)$$

$$V_{BE1} = V_{BE2} \Rightarrow \frac{I_{C1}}{I_{S1}} = \frac{I_{C2}}{I_{S2}} \Rightarrow I_{C1} = I_{C2}$$

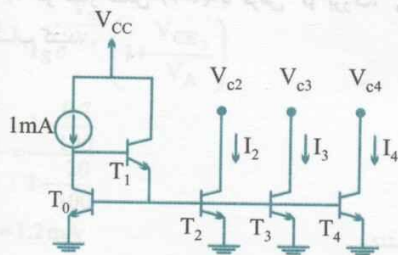
$$I_r = I_{C1} + I_{B3}$$

$$I_r = I_{C1} + \frac{I_{E3}}{1 + \beta} = I_{C1} + \frac{I_{B1} + I_{B2}}{1 + \beta}$$

$$I_r = I_{C1} + \frac{I_{C1}}{\beta(1 + \beta)} + \frac{I_{C3}}{(1 + \beta)\beta} = I_{C1} + \frac{I_{C1}}{\beta(1 + \beta)} + \frac{I_{C1}}{(1 + \beta)\beta}$$

$$I_{O2} = I_{O1} = \frac{I_r}{1 + \frac{2}{\beta^2 + \beta}} = I_r \frac{\beta^2 + \beta}{\beta^2 + \beta + 2}$$

طبق رابطه (۱۳-۴) تغییرات I_{O2} نسبت به تغییرات β دارای حساسیت بسیار کمتری نسبت به آینه جریان ساده است. آینه‌های جریانی که از ترانزیستورهای PNP ساخته می‌شوند غالباً از ترانزیستور ارتقادهنده Q_3 استفاده می‌شود؛ زیرا β در ترانزیستورهای PNP کمتر از β در ترانزیستورهای NPN است.



شکل ۱۱-۴

مثال ۸: در مدار شکل (۱۱-۴) با فرض β برابر با ۴۰ برای

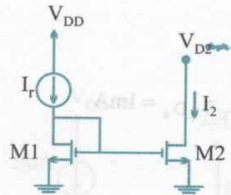
همه ترانزیستورها، جریان I_4 را به دست آورید. ولتاژ

کلکتورهای ترانزیستورها بیشتر از $V_{CE(sat)}$ است.

حل:

$$I_2 = I_3 = I_4 = \frac{I_r}{1 + \frac{4}{\beta^2 + \beta}} = 1mA \frac{\beta^2 + \beta}{\beta^2 + \beta + 4} = 0.997mA$$

۳-۴ آینه جریان ساده با ترانزیستور ماسفت



شکل ۱۲-۴

آینه جریان شکل (۱۲-۴) با ماسفت کانال (N) درست شده است که به وسیله جریان I_r تغذیه می‌شود، ترانزیستور M_1 در ناحیه فعال قرار دارد، ولتاژ درین M_2 باید M_2 را در ناحیه فعال نگه‌دارد یعنی $V_{D2} - V_{S2} > V_{GS2} - V_{T2}$ باشد:

چون $I_G = 0$ است، در این مدار داریم:

$$\frac{I_{D1}}{I_{D2}} = \frac{K_1 (V_{GS1} - V_{T1})^2 \left(1 + \frac{V_{DS1}}{V_{A1}}\right)}{K_2 (V_{GS2} - V_{T2})^2 \left(1 + \frac{V_{DS2}}{V_{A2}}\right)} \quad (14-4)$$

اگر ولتاژ آستانه‌ها برابر و $V_A \Rightarrow \infty$ باشد، در نتیجه:

$$\frac{I_{D1}}{I_{D2}} = \frac{K_1}{K_2} \quad (15-4)$$

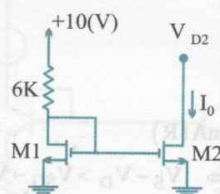
اگر $(\mu \cdot C_{ox})$ ها برابر باشند، آن‌گاه:

$$\frac{I_{D1}}{I_{D2}} = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_1}{\left(\frac{W}{L}\right)_2} \quad (16-4)$$

در صورت تشابه کامل ترانزیستورها $I_{D1} = I_{D2} = I_r$ است.

مثال ۹. در مدار شکل (۱۳-۴) جریان I_o را به دست آورید. ولتاژ درین M_2 ترانزیستور را در ناحیه فعال قرار داده است.

$$M_1 = M_2 \left(K = \frac{0.25 \text{ mA}}{V^2}, \quad V_T = 2 \text{ V}, \quad V_A = \infty \right)$$

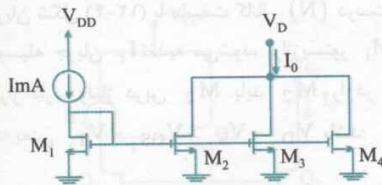


شکل ۱۳-۴

$$\begin{aligned} I_{D1} &= k(V_{GS} - V_T)^2 \\ I_{D1} &= K(10 - (6K)I_{D1} - V_T)^2 \\ I_{D1} &= 1 \text{ mA} \\ \frac{I_{D1}}{I_{D2}} &= \frac{K_1}{K_2} = 1 \Rightarrow I_{D2} = I_o = 1 \text{ mA} \end{aligned}$$

مثال ۱۰: در مدار شکل (۱۴-۴) جریان I_0 را به دست آورید. ترانزیستورها برابر است و گیت همه آنها به یکدیگر وصل شده است.

حل:



شکل ۱۴-۴

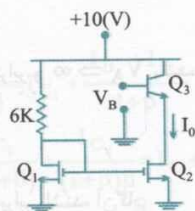
$$I_{D1} = I_{D2} = I_{D3} = I_{D4} = 1\text{mA}$$

$$I_0 = 3\text{mA}$$

مثال ۱۱: در مدار شکل (۱۵-۴)، حداقل ولتاژ V_B برای عملکرد درست مدار چقدر است؟

$$Q_1 = Q_2 \left(K = 0.25 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}, V_T = 2\text{V}, V_{BE} = 0.7\text{V} \right)$$

حل:



شکل ۱۵-۴

$$I_{D1} = K(V_{GS1} - V_T)^2$$

$$V_{GS1} = 10 - 6K(I_{D1})$$

$$I_{D1} = 1\text{mA} \Rightarrow V_{GS1} = 4\text{V} = V_{GS2}$$

$$Q_2 \text{ (فعال)} \Rightarrow V_{D2} - V_{S2} > V_{GS2} - V_T$$

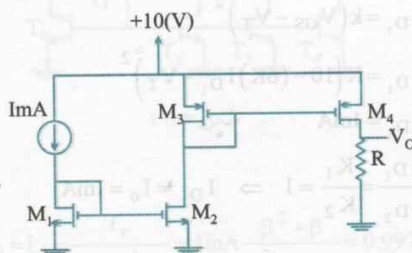
$$V_{D2} > 2 \text{ ولت}$$

$$V_B > 2.7 \text{ ولت}$$

مثال ۱۲: در مدار شکل (۱۶-۴) ترانزیستورها مشخصاتی به شرح زیر دارند. حداکثر مقاومت R را برای فعال ماندن مدار مشخص کنید.

$$\begin{cases} V_T = 2 \text{ ولت} \\ K_2 = 2K_1, K_4 = 2K_3 \\ K_4 = 0.25 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \end{cases}$$

حل:



شکل ۱۶-۴

$$I_1 = 1\text{mA}$$

$$I_2 = 2\text{mA} = I_3$$

$$I_4 = 4\text{mA}$$

$$V_0 = V_{S4} = 4\text{mA}(R)$$

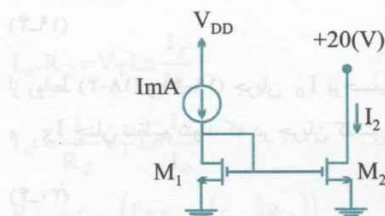
$$M_4 \text{ (فعال)} \Rightarrow V_S - V_D > V_{SG} - V_T$$

$$4\text{mA} = 0.25 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} (V_{SG4} - 2)^2 \Rightarrow V_{SG4} = 6\text{V}$$

$$10 - 4\text{mA}(R) > 6 - 2 \Rightarrow R < 1.5\text{K}$$

مثال ۱۳: در مدار شکل (۱۷-۴) ترانزیستورها برابر و $V_A = 100V$ ، $V_T = 2V$ ، $K = 0.25 \frac{mA}{V^2}$ است. جریان I_o را به دست آورید.

حل:



شکل ۱۷-۴

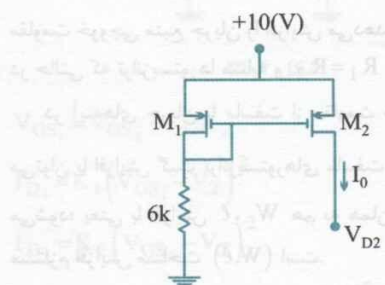
$$\frac{I_{D1}}{I_{D2}} = \frac{K_1}{K_2} \frac{(V_{GS1} - V_T)^2 \left(1 + \frac{V_{DS1}}{V_A}\right)}{(V_{GS2} - V_T)^2 \left(1 + \frac{V_{DS2}}{V_A}\right)}$$

$$\frac{I_{D1}}{I_{D2}} = \frac{1 + \frac{V_{DS1}}{V_A}}{1 + \frac{V_{DS2}}{V_A}}$$

$$V_{DS1} = V_{GS1} = 4V \Rightarrow I_{D2} = I_o = 1.15mA$$

مثال ۱۴: در مدار شکل (۱۸-۴) $K_2 = 10K_1$ است. $K_1 = 0.25 \frac{mA}{V^2}$ ، $V_T = 2V$ ، I_o را حساب کنید.

حل:



شکل ۱۸-۴

$$I_1 = K(V_{SG1} - V_T)^2$$

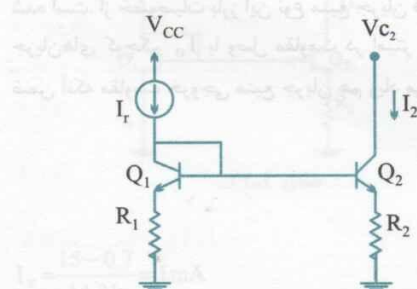
$$V_{SG1} = 10 - I_1(6K)$$

$$I_{D1} = 1mA$$

$$I_o = 10I_{D1} = 10mA$$

۴-۴ آینه جریان با مقاومت امیتر

در شکل (۱۹-۴) آینه جریان با مقاومت امیتر نشان داده شده است. Q_2 و V_{C2} را در ناحیه فعال قرار داده است.



شکل ۱۹-۴

در این مدار داریم:

$$V_{BE1} + I_{E1} \cdot R_1 = V_{BE2} + I_{E2} \cdot R_2 \quad (۱۷-۴)$$

$$V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{S1}} + \frac{I_{C1}}{\alpha_1} R_1 = V_T \ln \frac{I_{C2}}{I_{S2}} + \frac{I_{C2}}{\alpha_2} R_2 \quad (۱۸-۴)$$

$$I_r = I_{C1} + \frac{I_{C1}}{\beta_1} + \frac{I_{C2}}{\beta_2} \quad (۱۹-۴)$$

از روابط (۱۸-۴) و (۱۹-۴) جریان I_O برحسب تمام متغیرها به دست می‌آید. اگر فرض شود که β بزرگ باشد، $\alpha = 1$ و I_{S1} و I_{S2} چنان تنظیم شوند که در جریان کلکتور مربوط V_{BE} ها برابر باشند؛ یعنی:

$$V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{S1}} = V_T \ln \frac{I_{C2}}{I_{S2}} \quad (۲۰-۴)$$

$$I_{C1} \cdot R_1 = I_{C2} \cdot R_2 \quad (۲۱-۴)$$

$$I_r \cdot R_1 = I_O \cdot R_2 \quad (۲۲-۴)$$

$$I_O = I_r \frac{R_1}{R_2} \quad (۲۳-۴)$$

از ویژگی‌های خوب این نوع منبع جریان، قابلیت تغییر I_O به وسیله نسبت $\frac{R_1}{R_2}$ است. ضمن آنکه وجود مقاومت در امیتر،

مقاومت خروجی منبع جریان را افزایش می‌دهد. درضمن پایداری دمایی هم ایجاد می‌شود.

در حالتی که ترانزیستورها مشابه و $R_1 = R_2$ باشد، $I_{C1} = I_O$ است.

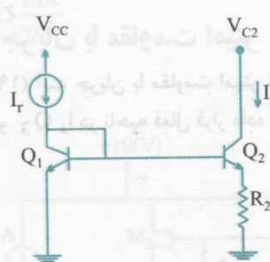
در آینه‌های جریان با ماسفت از مقاومت سورس به‌ندرت استفاده می‌شود. تطبیق ترانزیستورها در آینه جریان ماسفتی را

می‌توان با افزایش گیت ترانزیستورهای ماسفت بهبود بخشید. برای ثابت نگه‌داشتن جریان خروجی، نسبت $\frac{W}{\ell}$ ثابت نگه‌داشته

می‌شود؛ یعنی با افزایش ℓ ، W هم به همان نسبت زیاد می‌شود تا R_O زیاد شود. در این صورت افزایش مقاومت خروجی مستلزم افزایش مساحت $(W \cdot \ell)$ است.

۵-۴ منبع جریان ویدلر

در شکل (۲۰-۴) منبع جریان BJT از نوع ویدلر نشان داده شده است. از خصوصیات بارز این نوع منبع جریان قابلیت ایجاد جریان‌های کوچک I_O با وصل مقاومت در امیتر Q_2 است. ضمن آنکه مقاومت خروجی منبع جریان هم زیاد می‌شود.



شکل ۲۰-۴

$$V_{BE1} = V_{BE2} + \frac{I_O}{\alpha_2} \cdot R_2$$

(۲۴-۴)

$$V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{S1}} = V_T \ln \frac{I_{C2}}{I_{S2}} + \frac{I_0}{\alpha_2} R_2 \quad (25-4)$$

$$I_r = I_{C1} + \frac{I_{C1}}{\beta_1} + \frac{I_{C2}}{\beta_2} \quad (26-4)$$

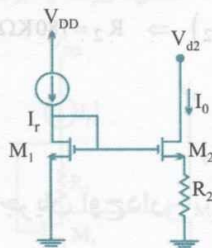
با فرض β بزرگ و I_S های برابر داریم:

$$I_0 R_2 = V_T \ln \frac{I_r}{I_0} \quad (27-4)$$

$$I_0 = \frac{1}{R_2} V_T \ln \frac{I_r}{I_0}$$

$$R_{or} \approx r_{ce2} \left(1 + g_{m2} (r_{\pi2} \parallel R_2) \right) \quad (28-4)$$

در شکل (۲۱-۴) منبع جریان ماسفت از نوع ویلر نشان داده شده است.



شکل ۲۱-۴

$$V_{GS1} = V_{GS2} + I_0 R_2 \quad (29-4)$$

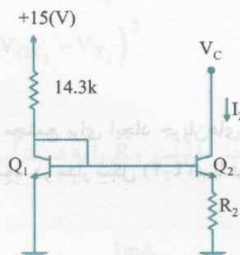
$$I_{D1} = K_1 (V_{GS1} - V_T)^2 \quad (30-4)$$

$$I_{D2} = K_2 (V_{GS2} - V_T)^2 \quad (31-4)$$

روابط (۲۹-۴) و (۳۰-۴) و (۳۱-۴) مقدار R_2 را برای جریان مورد نظر I_0 تعیین می کنند.

مثال ۱۵: در مدار شکل (۲۲-۴) اگر $I_2 = 10 \mu A$ باشد،

مقدار R_2 را حساب کنید. (β بزرگ)



شکل ۲۲-۴

$$I_r = \frac{15 - 0.7}{14.3k} \approx 1mA$$

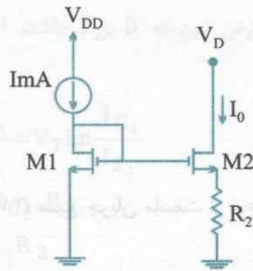
$$R_2 \approx \frac{1}{10 \mu A} (60mV) \log \frac{1mA}{10 \mu A} \approx 12K$$

اگر $\beta \approx 100$ و $V_A \approx 100$ ولت باشد، مقاومت خروجی R_o تقریباً برابر است با:

$$R_o \approx r_{ce2} \left(1 + g_{m2} \left(r_{\pi2} \parallel R_{E2} \right) \right) = 50 \text{ M}\Omega$$

مثال ۱۶: در مدار شکل (۲۳-۴) برای $I_o = 10 \mu\text{A}$ ، مقدار R_2 را به دست آورید.

$$V_T = 2\text{V}, \quad K = 0.25 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$



شکل ۲۳-۴

حل:

$$V_{GS1} = V_{GS2} + I_o (R_2)$$

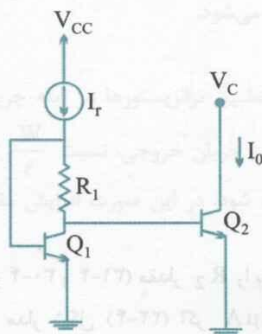
$$1\text{mA} = 0.25 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} (V_{GS1} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GS1} = 4\text{V}$$

$$10\mu\text{A} = 0.25 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} (V_{GS2} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GS2} = 2.2\text{V}$$

$$4 - 2.2 = 10\mu\text{A} (R_2) \Rightarrow R_2 = 180 \text{ K}\Omega$$

۶-۴ منبع جریان اوج دار

در شکل (۲۴-۴) منبع جریان اوج دار با ترانزیستور BJT نشان داده شده است.



شکل ۲۴-۴ منبع جریان اوج دار با BJT

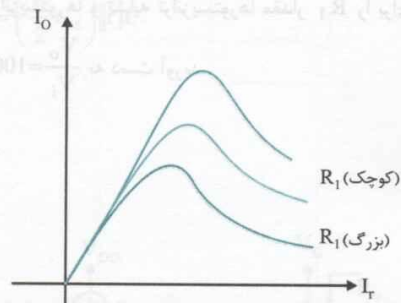
در مدارهای مجتمع برای ایجاد جریان‌های بسیار کوچک میکروآمپری از این نوع منبع جریان همراه با مقاومت کوچک R_1 استفاده می‌شود. در مدار شکل (۲۴-۴)، با فرض β بزرگ برای ترانزیستورها ($\alpha = 1$) و ولتاژ اری بزرگ داریم:

$$V_{BE1} = I_r (R_1) + V_{BE2} \quad (32-4)$$

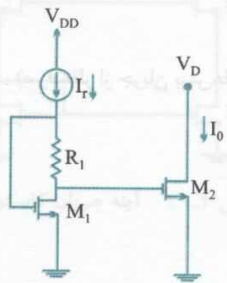
$$V_T \ln \frac{I_r}{I_{S1}} = I_r (R_1) + V_T \ln \frac{I_o}{I_{S2}} \quad (33-4)$$

با داشتن $I_{S1} = I_{S2}$ داریم:

$$I_r (R_1) = V_T \ln \frac{I_r}{I_o} \quad (34-4)$$

شکل ۲۵-۴ منحنی تغییرات I_O بر حسب I_I

در شکل (۲۵-۴) منحنی تغییرات I_O بر حسب I_I با مقاومت‌های مختلف R_1 نشان داده شده است.



شکل ۲۶-۴ منبع جریان اوج‌دار با ماسفت

جریان خروجی I_O وقتی به حداکثر می‌رسد که مقدار V_{BE} به حداکثر رسیده باشد.

در مدار شکل (۲۶-۴) منبع جریان اوج‌دار با ترانزیستور ماسفت نشان داده شده است:

$$V_{GS1} = I_I (R_1) + V_{GS2}$$

$$I_I = I_{D1}$$

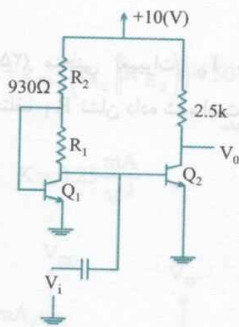
$$I_I = K_1 (V_{GS1} - V_{T1})^2$$

$$I_O = K_2 (V_{GS2} - V_{T2})^2$$

با در دست داشتن I_I و I_O و مشخصات ماسفت‌ها مقدار R_1 محاسبه می‌شود.

مثال ۱۷: در منبع جریان اوج‌دار شکل (۲۶-۴)، $I_O = 10 \mu A$ ، $I_I = 1 mA$ است. مقدار مقاومت R_1 را به دست آورید.

$$R_1 = \frac{1}{I_I} (60 mV) \log \frac{1 mA}{10 \mu A} = 120 \Omega$$



شکل ۲۷-۴

مثال ۱۸: در مدار شکل (۴-۲۷)، با فرض β بزرگ برای ترانزیستورها و تشابه ترانزیستورها مقدار R_1 را برای بهره $\frac{V_o}{V_i} = 100$ به دست آورید.

$$\frac{V_o}{V_i} = 100 = -g_m R_C = -\frac{I_{C_2}}{V_T} R_C \Rightarrow I_{C_2} = 1\text{mA}$$

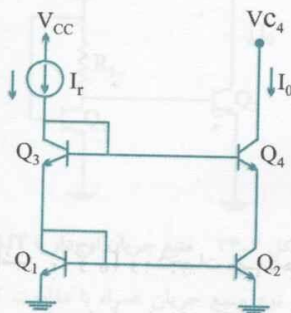
با داشتن β بزرگ (صرف نظر از جریان بیس‌ها):

$$I_{R_2} = I_r = \frac{10 - V_{BE1}}{930\Omega} = 10\text{mA}$$

$$R_1 = \frac{1}{10\text{mA}} (60\text{mV}) \log \frac{10\text{mA}}{1\text{mA}} \Rightarrow R_1 = 6\Omega$$

۲-۴ آینه جریان کاسکود با BJT

در شکل (۴-۲۸) این نوع آینه جریان نشان داده شده است. Q_1 و Q_2 آینه جریان ساده است. Q_4 به صورت بیس مشترک وصل شده است که همراه Q_2 ترکیب کاسکود را دارد. Q_3 به صورت اتصال دیودی است.



شکل ۲۸-۴ آینه جریان کاسکود

اگر β همه ترانزیستورها برابر فرض شوند، با نوشتن $I_C = \beta I_B$ و $I_E = (1 + \beta) I_B$ ، $I_C = \frac{\beta}{1 + \beta} I_o$ ، جریان I_o برحسب I_r به دست می‌آید:

$$I_o = I_r \left(\frac{\beta^2}{\beta^2 + 4\beta + 2} \right) \quad (38-4)$$

و با رسم مدل π برای مدار، مقاومت خروجی R_o تقریباً برابر است با:

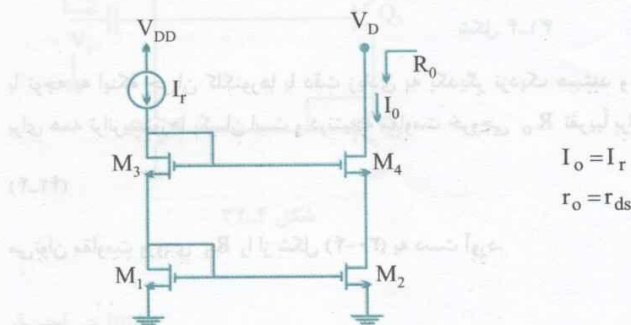
$$R_o \approx \frac{\beta}{2} r_{ce} \quad (39-4)$$

اگر مقاومت $r_{cb4} = r_{\mu}$ هم منظور شود، آن گاه:

$$R_o = \left(\frac{\beta}{2} r_{ce} \right) \parallel r_{\mu} \quad (40-4)$$

۸-۴ آینه جریان کاسکود با ماسفت

در مدار شکل (۲۹-۴) این نوع منبع جریان نشان داده شده است.



شکل ۲۹-۴ آینه جریان کاسکود

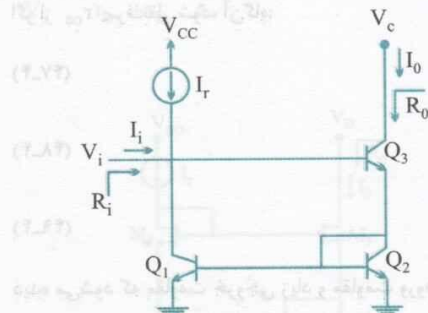
با رسم مدل ترانزیستورها مقاومت خروجی R_o به دست می آید.

$$R_o = g_m \cdot r_o^2$$

۹-۴ آینه جریان ویلسون با ترانزیستور BJT

در شکل (۳۰-۴) آینه جریان ویلسون نشان داده شده است.

این منبع جریان یکی از ۴ نوع مدار فیدبک است (در بخش فیدبک بررسی می شود). جریان خروجی I_o را می توان با نوشتن نسبت جریان بیس و امیتر و کلکتورهای ترانزیستورها به دست آورد.

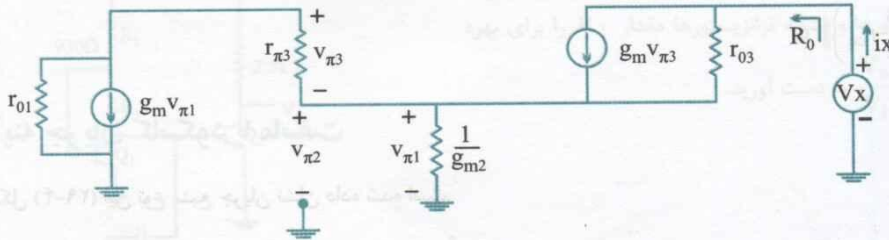


شکل ۳۰-۴ منبع جریان ویلسون

ترانزیستور Q_2 فعال است. ترانزیستور Q_1 فعال است؛ زیرا $V_{CE1} = V_{BE1} + V_{BE3}$ ، در نتیجه ترانزیستور Q_3 باید در ناحیه فعال قرار داشته باشد. حداقل ولتاژ کلکتور Q_3 برابر با $V_{BE2} + V_{CE(sat)}$ است.

$$I_o = I_r \left(\frac{\beta^2 + 2\beta}{\beta^2 + 2\beta + 2} \right) \quad (41-4)$$

برای تعیین مقاومت خروجی R_o طبق شکل (۳۱-۴) با نوشتن KVL و KCL، مقاومت خروجی حاصل می‌شود.



شکل ۳۱-۴

با توجه به اینکه جریان کلکتورها با دقت زیادی به یکدیگر نزدیک هستند و داشتن ترانزیستورهای مشابه، مقاومت $r_o = r_{ds}$ برای همه ترانزیستورها یکسان است و در نتیجه مقاومت خروجی R_o تقریباً برابر است با:

$$R_o = \frac{V_x}{i_x} \approx \frac{\beta r_o}{2} \quad (42-4)$$

می‌توان مقاومت ورودی R_i را از شکل (۳۰-۴) به دست آورد.

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} \quad (43-4)$$

$$V_i = V_{\pi_3} + V_{\pi_1} \quad (44-4)$$

$$V_{\pi_1} = g_m \cdot V_{\pi_3} \left(\frac{1}{g_{m_2}} \right) = V_{\pi_3} \quad (45-4)$$

$$V_i = 2V_{\pi_1} \quad (46-4)$$

$$i_i = g_m V_{\pi_1} + \frac{V_i}{r_{ce1}} + i_{b_3} \quad (47-4)$$

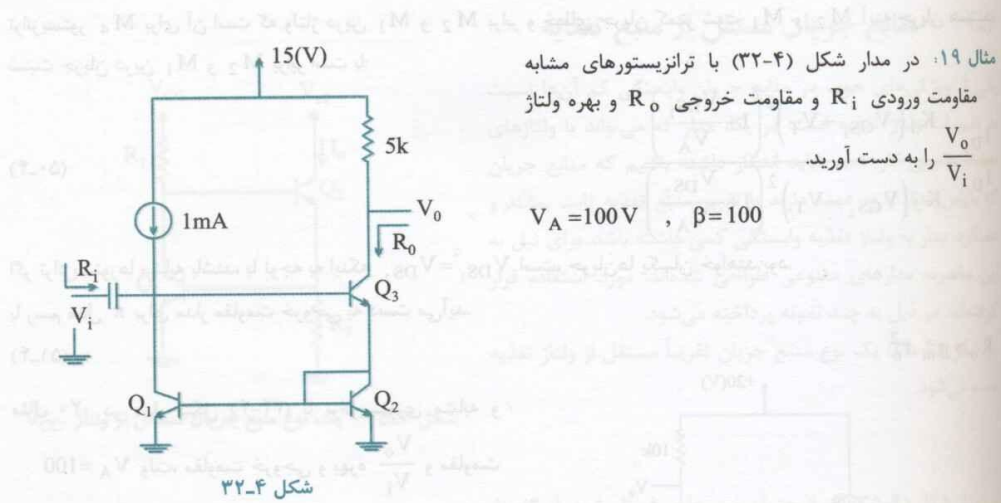
اگر از r_{ce} صرف‌نظر شود، آن‌گاه:

$$i_i = g_m V_{\pi_1} + \frac{g_m \cdot V_{\pi_3}}{\beta} \quad (48-4)$$

$$i_i = g_m \left(V_{\pi_1} + \frac{V_{\pi_1}}{\beta} \right) \quad (49-4)$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} \approx \frac{2}{g_m} \quad (50-4)$$

دیده می‌شود که مقاومت خروجی زیاد و مقاومت ورودی کم است.



$$I_o = I_r = 1mA$$

$$r_{ce} = r_o = \frac{V_A}{I_C} \approx 100K$$

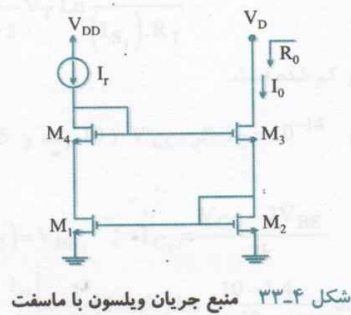
$$R_o \approx \frac{\beta r_{ce}}{2} \approx 5M\Omega$$

$$R_i = \frac{2}{g_m} \approx 50\Omega$$

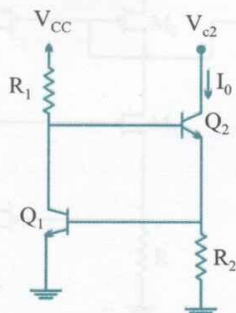
$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_{C3}}{r_{e3} + r_{e2}} \approx -100$$

۱۰-۴ منبع جریان ویلسون با ماسفت

در شکل (۳۳-۴) منبع جریان ویلسون با ماسفت نشان داده شده است.



۱۱-۴ منابع جریان مستقل از منبع تغذیه



یکی از ویژگی‌های خوب در منابع جریان وابستگی کم آن‌ها نسبت به تغییرات ولتاژ تغذیه است. در یک مدار که می‌تواند با ولتاژهای تغذیه وسیعی کار کند، شاید انتظار داشته باشیم که منابع جریان که بایاس مدار را به عهده دارند با تغییر منبع تغذیه ثابت بمانند و عملکرد مدار به ولتاژ تغذیه وابستگی کمی داشته باشد. برای نیل به این مقصود، مدارهای متنوعی طراحی شده‌اند. مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ذیل به چند نمونه پرداخته می‌شود.

در شکل (۳۵-۴) یک نوع منبع جریان تقریباً مستقل از ولتاژ تغذیه دیده می‌شود.

شکل ۳۵-۴ یک نوع منبع جریان مستقل از ولتاژ V_{CC}

در مدار شکل (۳۵-۴) اگر از جریان بیس‌ها صرف‌نظر شود، آن‌گاه داریم:

$$V_{BE1} = I_o (R_2)$$

$$V_T \ln \frac{I_r}{I_{S1}} = I_o (R_2)$$

$$I_o = \frac{1}{R_2} V_T \ln \frac{I_r}{I_{S1}}$$

$$I_r = \frac{V_{CC} - 2V_{BE}}{R_1}$$

$$I_o = \frac{1}{R_2} V_T \ln \frac{V_{CC} - 2V_{BE}}{(I_{S1}) R_1}$$

اگر $V_{CC} \gg 2V_{BE}$ باشد، داریم:

$$I_o = \frac{1}{R_2} V_T \ln \frac{V_{CC}}{(I_{S1}) R_1}$$

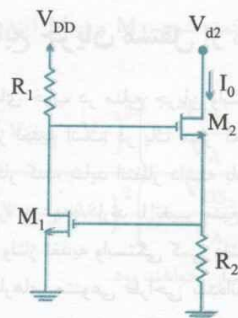
در رابطه اخیر دیده می‌شود که تغییرات I_o نسبت به تغییرات V_{CC} بسیار کم شده است.

مثال ۲۱: در منبع جریان شکل (۳۵-۴) با فرض $R_1 = R_2 = 1K\Omega$ ، $I_S = 10^{-14}$ اگر V_{CC} (۱۰ ولت و ۱۵ ولت) باشد، I_o در این دو حالت چقدر است؟

$$I_o (R_2) = V_{BE1}, \quad I_{C1} = \frac{V_{CC} - 2V_{BE}}{2k}$$

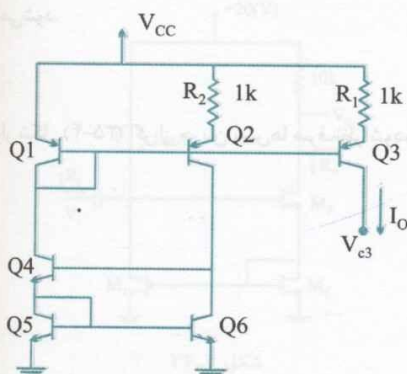
$$V_{CC} = 10 \quad \left| \quad I_o = \frac{1}{1K} (25mV) \ln \frac{10 - 1.4}{10^{-14} \times 2K} \approx 0.67 \text{ mA} \right.$$

$$V_{CC} = 15 \quad \left| \quad I_o = \frac{1}{1K} (25mV) \ln \frac{15 - 1.4}{10^{-14} \times 2K} \approx 0.68 \text{ mA} \right.$$



شکل ۳۶-۴

در شکل (۳۶-۴) یک نوع منبع جریان مستقل با ماسفت نشان داده شده است.



شکل ۳۷-۴

مثال ۲۲: در مدار شکل (۳۷-۴) که به صورت منبع جریان مستقل از منبع تغذیه کار می‌کند، جریان خروجی I_0 را به دست آورید.

$$(Q_1 = Q_2 = Q_3) \\ I_{S_5} = 10(I_{S_6})$$

β همه ترانزیستورها را بزرگ فرض کنید.

حل: $Q_1 - Q_2$ و $Q_3 - Q_1$ به صورت منبع جریان ویدلر کار می‌کنند:

$$I_3 = I_2 = I_0$$

$$I_2 = \frac{1}{R_2} V_T \ln \frac{I_1}{I_2}$$

$$I_1 = I_4 = I_5$$

$$I_2 = I_6$$

$$I_2 = I_0 = \frac{1}{R_2} V_T \ln \frac{I_5}{I_6}, \quad V_T \ln \frac{I_6}{I_{S_6}} = V_T \ln \frac{I_5}{I_{S_5}}$$

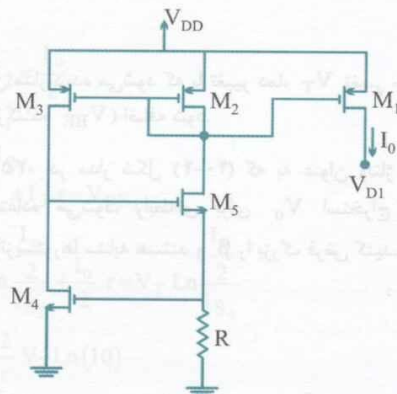
$$I_0 = \frac{1}{1K} V_T \ln \frac{I_{S_5}}{I_{S_6}}$$

$$I_0 = \frac{1}{1K} 60 \text{ mV} \log 10 = 60 \mu \text{ A}$$

در مدار شکل (۳۷-۴)، جریان I_0 وابستگی خیلی کمی به ولتاژ تغذیه دارد.

ولتاژ تغذیه دارای حداقل و حداکثری است. حداقل مقدار V_{CC} ، مقداری است که Q_4 اشباع نشود.

$$V_{CC_{\min}} = V_{BE_5} + V_{CE(\text{sat})_4} + V_{BE_1}$$



شکل ۳۸-۴

مثال ۲۳: در مدار شکل (۳۸-۴)، $I_0 = 10 \mu A$ است.

ترانزیستورها مشابه هستند. مقاومت R را به دست آورید.

$$K = 0.25 \frac{mA}{V^2}, \quad V_T = 1V$$

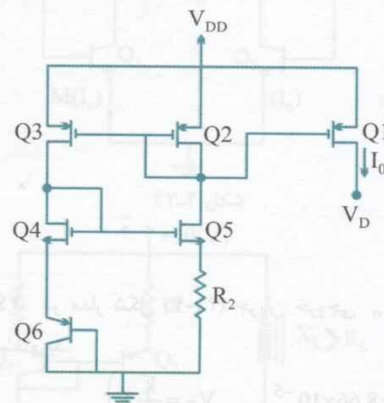
$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_5 = I_0$$

$$V_{GS4} = I_0(R)$$

$$10 \mu A = 0.25 \frac{mA}{V^2} (V_{GS4} - 1)^2$$

$$V_{GS4} = 1.2V$$

$$R = 120 K\Omega$$



شکل ۳۹-۴

مثال ۲۴: در مدار شکل (۳۹-۴)، $I_0 = 10 \mu A$ است. با

فرض ترانزیستورهای ماسفت برابر و V_{BE} در جریان یک

میلی آمپر برابر با 0.7 ولت، مقاومت R را به دست آورید.

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = 10 \mu A$$

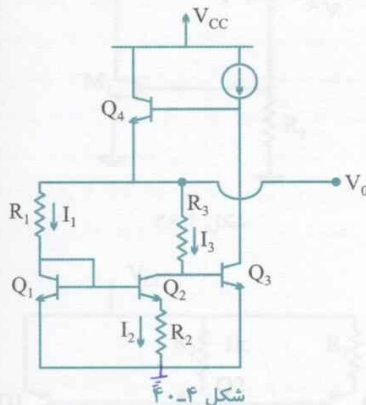
$$V_{GS4} + V_{EB6} = V_{GS5} + 10 \mu A(R)$$

$$V_{EB6} = 10 \mu A(R)$$

$$\left. \frac{V_{EB6}}{10 \mu A} \right| = 0.7 + V_T \ln \frac{10 \mu A}{1 mA} = 580 mV$$

$$R = \frac{580 \text{ mV}}{10 \mu\text{A}} = 58 \text{ K}\Omega$$

در این مدار دیده می‌شود که با تغییر دما، V_T تغییر می‌کند؛ بنابراین برای جبران‌سازی دمایی V_{BE} باید مدارهای جبران‌ساز (پایدارکننده V_{BE}) اضافه شود.



مثال ۲۵: در مدار شکل (۴-۴۰) که به عنوان ولتاژ مرجع استفاده می‌شود، رابطه‌ای برای V_0 استخراج کنید. ترانزیستورها مشابه هستند و β را بزرگ فرض کنید.

$$V_0 = V_{BE3} + I_{C3}(R_3)$$

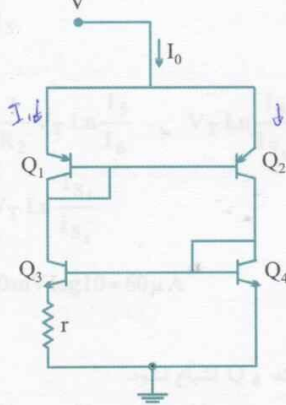
$$V_0 = V_{BE3} + I_2(R_3)$$

$$V_0 = V_{BE3} + \frac{R_3}{R_2} V_T \ln \frac{I_1}{I_2}$$

$$I_1 = \frac{V_0 - V_{BE1}}{R_1}$$

$$V_0 = V_{BE3} + \frac{R_3}{R_2} V_T \ln \frac{V_0 - V_{BE1}}{R_1 \cdot I_2}$$

$$V_{BE3} = V_T \ln \frac{I_3}{I_{S3}}$$



مثال ۲۶: در مدار شکل (۴-۴۱) جریان خروجی I_0 را به دست آورید.

$$\left(\frac{K}{q} = 8.66 \times 10^{-5}, \quad V_T = \frac{k}{q} T \right)$$

$$I_{S3} = 10(I_{S4}), \quad Q_1 = Q_2, \quad \beta \text{ بزرگ}$$

شکل ۴-۴۱

حل:

$$I_1 = I_2 = \frac{I_o}{2}$$

$$I_3 = I_1$$

$$I_4 = I_2$$

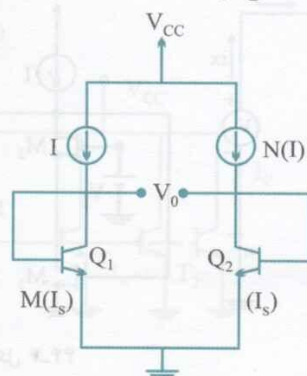
$$V_{BE3} + I_3 \cdot r = V_{BE4}$$

$$V_T \ln \frac{I_o}{2 I_{S3}} + \frac{I_o}{2} \cdot r = V_T \ln \frac{I_o}{I_{S4}}$$

$$I_o = \frac{2}{r} V_T \ln(10)$$

$$I_o = \left[\left(\frac{2}{r} \times 8.66 \times 10^{-5} \right) (273^\circ + T^\circ C) \right] \ln(10)$$

با افزایش دمای T ، جریان I_o افزایش می‌یابد. این مدار را می‌توان به نام مدار با جریان خروجی متناسب با دما (PTAT) نام‌گذاری کرد. بسیاری از حس‌کننده‌های دمایی (سنسور دمایی) با این روش ساخته می‌شوند.



شکل ۴۲-۴

مثال ۲۷: در مدار شکل (۴۲-۴)، رابطه ولتاژ خروجی را بر حسب دما بنویسید.

حل:

$$V_o = V_{BE1} - V_{BE2}$$

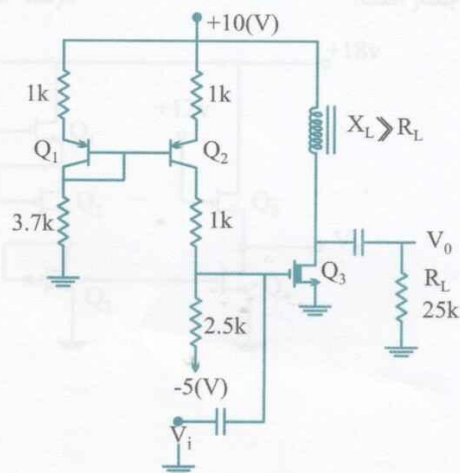
$$V_o = V_T \ln \frac{I}{M(I_S)} - V_T \ln \frac{NI}{I_S}$$

$$V_o = V_T \ln \frac{1}{M \cdot N} = \frac{k}{q} (T) \ln \frac{1}{M \cdot N}$$

مثال ۲۸: در مدار شکل (۴۳-۴) بهره $\frac{V_o}{V_i}$ را به دست آورید.

$$I_{DSS} = 10 \text{ mA}, \quad V_P = -2 \text{ V}$$

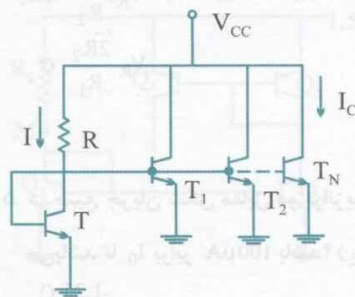
$$\beta \text{ (بزرگ)}, \quad |V_{BE}| = 0.6, \quad X_L \gg R_L$$



شکل ۴۳-۴

مجموعه تست‌های آزمون سراسری

(ارشده ۸۵)

۱. در مدار شکل زیر جریان I_C کدام یک از گزینه‌های زیر است؟

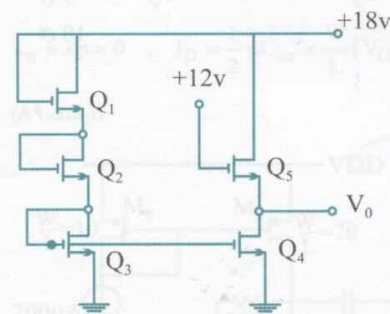
$$I_C = I \quad (۱)$$

$$I_C = \frac{\beta I}{\beta + 1} \quad (۲)$$

$$I_C = \frac{\beta I}{\beta + N + 1} \quad (۳)$$

$$I_C = \frac{\beta I}{N + 1} \quad (۴)$$

(ارشده ۸۶)

۲. در مدار مقابل همه MOSFET ها مشابه هستند. ولتاژ V_0 چقدر است؟

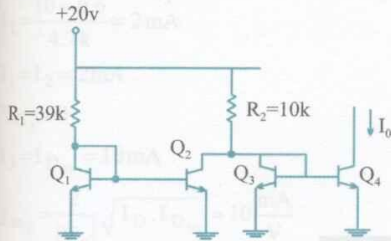
$$6\text{ v} \quad (۱)$$

$$9\text{ v} \quad (۲)$$

$$10\text{ v} \quad (۳)$$

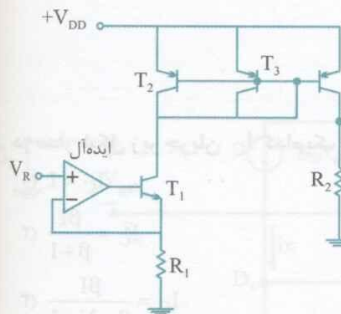
$$12\text{ v} \quad (۴)$$

۳. مقدار جریان I_0 در مدار شکل روبه‌رو به کدام گزینه نزدیک‌تر است؟ ($V_{BE} = 0.5\text{ V}$, $\beta \rightarrow \infty$) (ارشده ۸۶)



- (۱) صفر
(۲) 1.45 mA
(۳) 1.6 mA
(۴) 1.95 mA

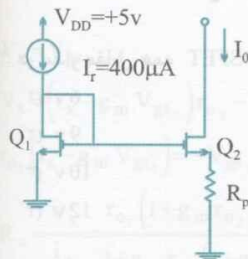
۴. در مدار شکل مقابل با فرض تشابه ترانزیستورهای pnp و خیلی بزرگ بودن β همه ترانزیستورها ولتاژ خروجی برابر کدام است؟ ($V_A \rightarrow \infty$) (ارشده ۸۶)



- (۱) $V_R \frac{R_1}{2R_2}$
(۲) $V_R \frac{R_2}{2R_1}$
(۳) $V_R \frac{2R_1}{R_2}$
(۴) $V_R \frac{2R_2}{R_1}$

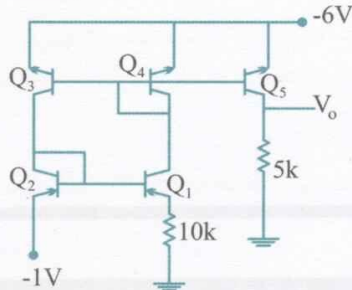
۵. در منبع جریان شکل مقابل دو ترانزیستور مشابه و $K'_n \frac{W}{L} = 0.8 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$ می‌باشد. مقدار R_p برحسب $k\Omega$ چقدر

می‌باشد تا I_0 برابر $100\mu\text{A}$ باشد؟ (Q_2 در ناحیه فعال است.) (ارشده ۸۸)



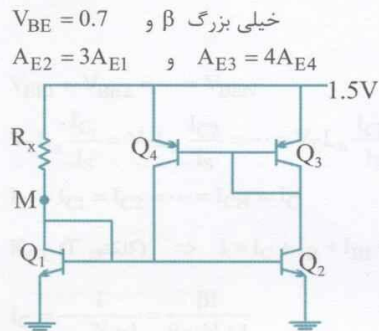
- (۱) 1.25
(۲) 2.5
(۳) 5
(۴) 10

۶. در مدار شکل مقابل ابعاد ترانزیستورهای Q_1 تا Q_5 یکسان هستند. اگر β ترانزیستورها بسیار بزرگ باشد، ولتاژ V_o برحسب ولت به کدام مقدار نزدیک تر است؟ (ارشد ۸۹)



- (۱) -2
- (۲) -1
- (۳) -0.5
- (۴) 0

۷. در مدار شکل مقابل مساحت پیوند بیس امیتر ترانزیستور Q_2 3 برابر Q_1 و مساحت پیوند بیس امیتر Q_3 4 برابر Q_4 است. اگر جریان کلکتور Q_1 برابر با 1 mA باشد، در این صورت مقاومت R_x برحسب کیلو اهم ($k\Omega$) تقریباً کدام است؟ (ارشد ۸۹)



- (۱) 3.2
- (۲) 1.6
- (۳) 2.4
- (۴) 0.8

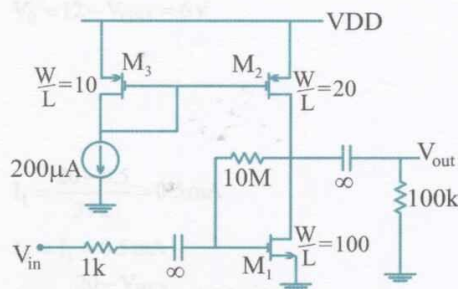
۸. در مدار شکل مقابل داریم:

$$\mu_n c_{ox} = 200 \frac{\mu A}{V^2}, \quad \mu_p c_{ox} = 50 \frac{\mu A}{V^2}, \quad V_{tn} = 0.7 V, \quad V_{tp} = -0.7 V$$

$$\lambda_n = \lambda_p = 0, \quad I_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \times \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

(ارشد ۸۹)

بهره ولتاژ مدار $\left[\frac{V_{out}}{V_{in}} \right]$ به کدام مقدار نزدیک تر است؟



- (۱) -400
- (۲) -200
- (۳) -280
- (۴) -140

پاسخنامه

$$V_{BE1} = V_{BE2} = \dots = V_{BEN}$$

$$V_T L_n \frac{I_{C1}}{I_S} = V_T L_n \frac{I_{C2}}{I_S} = \dots = V_T L_n \frac{I_{CN}}{I_S}$$

$$I_C = I_{C1} = I_{C2} = \dots = I_{CN} = I_C$$

$$K_{CL} (T \text{ کلکتور}) \Rightarrow I = I_C + I_B + I_{B1} + I_{B2} + \dots + I_{BN} = I_C + \frac{I_C}{\beta} + \frac{I_C}{\beta} + \dots + \frac{I_C}{\beta}$$

$$I_C = \frac{I}{1 + \frac{N+1}{\beta}} = \frac{\beta I}{\beta + N + 1}$$

$$V_{GS1} = V_{GS2} = V_{GS3} = \frac{18}{3} = 6 \text{ V}$$

$$V_{GS4} = V_{GS3} = 6 \text{ V}$$

$$I_4 = I_5 \Rightarrow V_{GS4} = V_{GS5} = 6$$

$$V_0 = 12 - V_{GS5} = 6 \text{ V}$$

$$I_1 = \frac{20 - 0.5}{39 \text{ k}} = 0.5 \text{ mA}$$

$$I_2 = I_1 = 0.5 \text{ mA}$$

$$I_{R2} = \frac{20 - V_{BE3}}{10 \text{ k}} = 1.95 \text{ mA}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \dots = I_{CN} = I_C$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \dots = I_{CN} = I_C$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \dots = I_{CN} = I_C$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \dots = I_{CN} = I_C$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \dots = I_{CN} = I_C$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \dots = I_{CN} = I_C$$

با توجه به I_S های برابر، I_C ها هم برابرند.

۲. گزینه ۱ درست است.

۳. گزینه ۲ درست است.

Q_2 و Q_1 آینه جریان

Q_4 و Q_3 آینه جریان

$$I_3 = I_{R2} - I_2 = 1.45 \text{ mA}$$

$$I_0 = I_3 = 1.45 \text{ mA}$$

۴. گزینه ۲ درست است.

با توجه به آپ امپ ایده آل که در حلقه فیدبک منفی قرار دارد، ولتاژ قطب مثبت و منفی برابر با V_R است.

$$I = I_{T1} = \frac{V_R}{R_1} \Rightarrow I_2 = I_3 = I_4 = \frac{I}{2}$$

جریان I بین T_2 و T_3 به صورت مساوی تقسیم می شود و T_3 و T_4 آینه جریان است.

$$V_0 = \frac{I}{2} \cdot R_2 = \frac{V_R}{2R_1} \cdot R_2$$

۵. گزینه ۳ درست است.

$$0.4 \text{ mA} = \frac{0.8}{2} (V_{GS1} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GS1} = 1 + V_t$$

$$0.1 \text{ mA} = \frac{0.8}{2} (V_{GS2} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GS2} = \frac{1}{2} + V_t$$

$$V_{GS1} = V_{GS2} + I_0 (R_P)$$

$$1 + V_t = \frac{1}{2} + V_t + 0.1 \text{ mA} (R_P) \Rightarrow R_P = 5 \text{ k}$$

۶. گزینه ۳ درست است.

$$-1 + V_{BE2} = V_{BE1} + I_1 (10 \text{ k}) \Rightarrow I_1 = 0.1 \text{ mA}$$

$$I_{1,2,3,4,5} = 0.1 \text{ mA} \Rightarrow V_0 = -0.5 \text{ V}$$

۷. گزینه ۱ درست است.

$$I_{S2} = 3I_{S1} \Rightarrow I_2 = 3I_1 = 3 \text{ mA} \Rightarrow I_3 = 3 \text{ mA}$$

$$I_{S3} = 4I_{S4} \Rightarrow I_4 = \frac{1}{4} I_3 \Rightarrow I_4 = \frac{3}{4} \text{ mA}$$

$$K_{CL} (M \text{ گره}) \Rightarrow \frac{0.7 - 1.5}{R_x} + I_{C1} - I_{C4} = 0$$

$$-\frac{0.8}{R_x} + 1 \text{ mA} - 0.75 \text{ mA} = 0 \Rightarrow R_x = 3.2 \text{ k}$$

۸. گزینه ۱ درست است.

$$\lambda = 0 \Rightarrow r_d = \infty$$

$$I_3 = \frac{1}{2} I_2 \Rightarrow I_2 = 0.4 \text{ mA} = I_1$$

$$M_1 \Rightarrow 0.4 \text{ mA} = \frac{1}{2} \left(200 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}^2} \right) 100 (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GS} - V_T = 0.2$$

$$g_{m1} = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_T} = 4 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -g_{m1} R'_{L1} = -400$$