

СТРУЈНО ОГЛЕДАЛО СО СПОЈНИ ФЕТОВИ

Д-р Томислав Ангелов Джекoв, Д-р Цветан Владимиров Гавровски

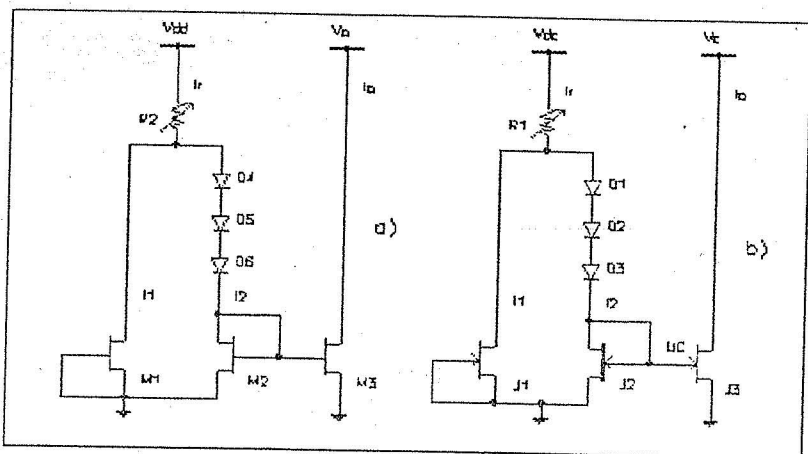
Електротехнички факултет, "Универзитет Кирил и Методиј"
Скопје, Република Македонија

Клучни зборови: Струјно огледало, Споен фет

Резиме: Предложена е и анализирана нова шема на струјно огледало, базирана на спојни фетови. Употребените транзистори по претпоставка се идентични, што практично не е тешко да се постигне во технологијата на монокристалните интегрирани кола. За да се овозможи, барем грубо, тестирање, на шемата, соодветното коло беше реализирано во дискретна форма преку внимателен избор на транзистори со приближно исти струјно-напонски карактеристики. Како верификација на очекуваните резултати послужија и соодветни симулации со програмот SPICE.

1. Вовед

Во [1] е предложена нова шема на струјно огледало, составена од n -канални MES-транзистори (MESFET) со вграден канал, наменета за интегрираната технологија на база на GaAs, Сл.1-а. Сличноста во структурата меѓу силициумските спојни фетови и MES-транзисторите, ја сугерира можноста за реализација на слично интегрирано коло и со n -канални спојни фетови, Сл 1-б. Задачата на овој труд се состои токму во разгледување на колото од Сл. 1-б и утврдувањето на можностите истото да најде примена како струјно огледало во технологијата на силициумските монокристални интегрирани кола. Како извршине анализа користејќи се со два различни школски модела на спојниот фет: едноставниот модел на Скичман и Ходжис



Сл. 1. Струјно огледало: а) со п-канални MES-транзистори со вграден канал (според [1]),
 б) со п-канални спојни фетови

(Schichman, Hodges) и природниот модел базиран на поедноставената теорија на рп-спојот. Потоа ќе ги дадеме резултатите од мерењата врз дискретни реализации на ова коло базирани на два типа на спојни фетови.

Разгледувањето ќе го завршиме прикажувајќи ја зависноста $I_0 = I_0(I_i)$ добиена при симулирање на колото со програмот SPICE за два различни случани.

2. Анализа базирана на моделот на Скичман и Ходжис

Моделот на Скичман и Ходжис, како што е познато, е дефиниран како што следува:

$$I_D = \beta(U_{GS} - V_{TH})U_{DS} - \frac{\beta}{2}U_{DS}^2,$$

$$\text{за } U_{GS} \geq V_{TH} \text{ и } U_{DS} \leq U_{GS} - V_{TH} \quad (\text{омска област})$$

$$I_D = \frac{\beta}{2}(U_{GS} - V_{TH})^2,$$

$$\text{за } U_{GS} \geq V_{TH} \text{ и } U_{DS} \leq U_{GS} - V_{TH} \quad (\text{области на конс. струи})$$

$$I_D = 0, \text{ за } U_{GS} < V_{TH} \quad (\text{области на запирање}) \quad (1)$$

каде што β е транскондуктивната константа на транзисторот, поврзана со струјата на заситување при кратко споен гејт со релацијата

$$I_{DSS} = \frac{\beta}{2} V_{TH}^2 \quad (2)$$

а V_{TH} е напонот на прагот.

При анализата на колото од Сл. 1-а, авторите во [1] го употребиле всушност моделот на Скичман и Ходжис. Тоа автоматски имплицира дека од аспект на овој модел, а во рамките на неговата соодветност за спојниот фет, и колото од Сл.1-б ќе претставува струјно огледало. Според тоа, овој дел од дискусијата би можеле и да го изоставиме. Сепак во интерес на целовитоста на разгледувањето, ќе повториме, на свој начин, дел од таа анализа, адаптирајќи ја, се разбира, кон колото на Сл. 1-б.

За $I_r > I_{DSS}$, транзисторот J_1 е во областа на константни струи со $U_{GS} = 0^1$, J_2 е во омската област со $U_{DS} \equiv U_{GS} = U_C$ и J_3 е во областа на константни струи со $U_{GS} = U_C$, па може да се напише:

$$I_1 = I_{DSS} = \frac{\beta}{2} V_{TH}^2 \quad (3)$$

$$I_2 = \beta(U_C - V_{TH})U_C - \frac{\beta}{2} U_C^2 \quad (4)$$

$$I_0 = \frac{\beta}{2} (U_C - V_{TH})^2 \quad (5)$$

Ако ги собереме (3) и (4) за да го добиеме I_r , ќе дојдеме до израз идентичен со изразот (5). Според тоа заклучуваме дека важи $I_0 \equiv I_r$, за $I_r > I_{DSS}$. Со тоа фактички сме потврдиле дека, во границите на соодветноста на моделот на Скичман и Ходжис за спојниот фет, колото од Сл.1-б навистина претставува струјно огледало во одредено подрачје на вредности на струјата I_r .

Треба да се забележи дека во работното подрачје напонот U_C може да биде само позитивен и дека максималната дозволена вредност на струјата I_r , што значи и на I_0 , ќе биде одредена со максималната дозволена вредност на

¹ Диодите служат за да спречат течење на струја низ транзисторот J_2 (референтен транзистор) се додека струјата I_r не ја надмине вредноста I_{DSS} , кога транзисторот J_1 влегува во областа на константни струи.

Ус. Ако оваа вредност ја означиме со V_δ , согласно (1) и (5) ќе можеме да напишеме:

$$I_{DSS} \leq I_r \equiv I_o \leq I_{DSS} \left(1 + \frac{V_\delta}{|V_{TH}|} \right)^2 \quad (6)$$

Како интересен параметар се јавува односот меѓу горната и долната граница,

$$\gamma = \left(1 + \frac{V_\delta}{|V_{TH}|} \right)^2 \quad (7)$$

кој снажно зависи од праговниот напон на спојниот фет, V_{TH} . Мал V_{TH} значи голем γ .

3. Анализа базирана на природниот модел на спојниот фет

Природниот модел на спојниот фет, за разлика од моделот на Скичман и Ходжис - кој е емпириски по својот карактер, е добиен по пат на поедноставена теориска анализа на овој електронски елемент. Тој е забележително по сложен од претходниот (се јавуваат три наместо два параметри) но точно затоа е интересно да се види дали и според него колото на Сл. 1-b ќе претставува идеално струјно огледало или пак само приближно така ќе се однесува. Даден е со релациите:

$$I_D = G_o \left\{ U_{DS} + \frac{2}{3} (\varphi_o + V_{TH}) \left[\left(\frac{\varphi_o + U_{GS} - U_{DS}}{\varphi_o + V_{TH}} \right)^{3/2} - \left(\frac{\varphi_o + U_{GS}}{\varphi_o + V_{TH}} \right)^{3/2} \right] \right\}$$

за $U_{GS} \geq V_{TH}$ и $U_{DS} \leq U_{GS} - V_{TH}$ (омска област)

$$I_D = G_o \left\{ U_{GS} - V_{TH} + \frac{2}{3} (\varphi_o + V_{TH}) \left[1 - \left(\frac{\varphi_o + U_{GS}}{\varphi_o + V_{TH}} \right)^{3/2} \right] \right\}$$

за $U_{GS} \geq V_{TH}$ и $U_{DS} \geq U_{GS} - V_{TH}$ (област на конст. струи)

$$I_D = 0, \quad \text{за } U_{GS} \leq V_{TH} \quad (\text{област на заширање}) \quad (8)$$

каде што G_0 е проводноста на слојот во кој се формира каналот, V_{TH} е праговниот напон и $\varphi_0 < 0$ е контактната потенцијална разлика меѓу гејтот и каналот.² Согласно (8), константата G_0 и струјата I_{DSS} се поврзани со релацијата:

$$I_{DSS} = G_0 \left\{ -V_{TH} + \frac{2}{3}(\varphi_0 + V_{TH}) \left[1 - \left(\frac{\varphi_0}{\varphi_0 + V_{TH}} \right)^{3/2} \right] \right\} \quad (9)$$

Како што рековме, за $I_r > I_{DSS}$ транзисторите J_1 и J_3 ќе бидат во областа на константни струи, а транзисторот J_2 во омската област, па, согласно (8) ќе важи:

$$I_1 = I_{DSS} \quad (10)$$

$$I_2 = G_0 \left\{ U_C + \frac{2}{3}(\varphi_0 + V_{TH}) \left[\left(\frac{\varphi_0}{\varphi_0 + V_{TH}} \right)^{3/2} - \left(\frac{\varphi_0 + U_C}{\varphi_0 + V_{TH}} \right)^{3/2} \right] \right\} \quad (11)$$

$$I_0 = G_0 \left\{ U_C - V_{TH} + \frac{2}{3}(\varphi_0 + V_{TH}) \left[1 - \left(\frac{\varphi_0 + U_C}{\varphi_0 + V_{TH}} \right)^{3/2} \right] \right\} \quad (12)$$

Сумирајќи ги I_1 и I_2 за да го најдеме изразот за I_r , добиваме израз идентичен со десната страна на релацијата (12). Според тоа можеме да заклучиме дека и овде, како и во случајот со претходниот модел, важи $I_0 \equiv I_r$, за $I_r > I_{DSS}$. Ова е навистина изненадувачки резултат бидејќи изразите (8), со кои е дефиниран природниот модел се разликуваат значително од изразите (1) со кои е дефиниран моделот на на Скичман и Ходжис. И овде наоѓаме дека важи:

$$I_{DSS} \leq I_r \equiv I_0 \leq \gamma I_{DSS}, \quad (13)$$

но сега γ ќе биде дадено со изразот:

² Се претпоставува униформна легираност на каналскиот слој.

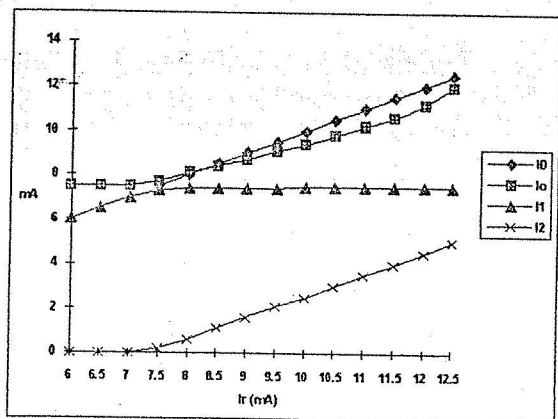
$$\gamma = \left\{ \frac{V_{\delta} + \frac{2}{3}(\varphi_0 + V_{TH}) \left[\left(\frac{\varphi_0}{\varphi_0 + V_{TH}} \right)^{3/2} - \left(\frac{\varphi_0 + V_{\delta}}{\varphi_0 + V_{TH}} \right)^{3/2} \right]}{-V_{TH} + \frac{2}{3}(\varphi_0 + V_{TH}) \left[1 - \left(\frac{\varphi_0}{\varphi_0 + V_{TH}} \right)^{3/2} \right]} \right\} \quad (14)$$

што директно следува од (9) и (12) и ограничувањето $U_C \leq V_{\delta}$.

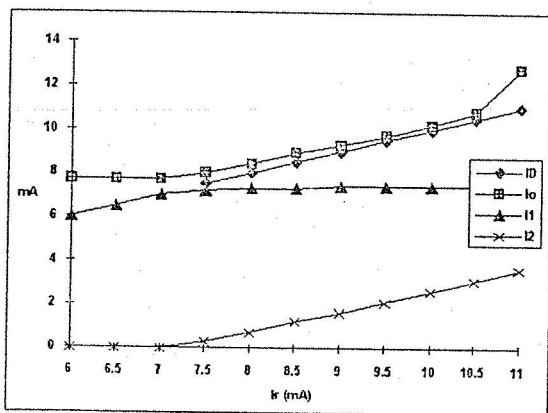
4. Резултати од извршени мерења на реализиран дискретен прототип

Вистинското потврдување на погоре изнесените теориски резултати бара реализација на шемата од Сл. 1-b во интегрирана форма, бидејќи само интегрираната технологија овозможува изведба на транзистори со практично идентични карактеристики и нивно поставување во заеднички температурен амбиент, што претставува основен услов за правилна работа на ова коло. Во неможност од еден таков пристап, извршивме одредени мерења на дискретна реализација на колото од Сл. 1-b, и тоа со транзистори од типот BF245B, Сл. 2., односно со транзистори од типот BC264A, Сл. 3. При тоа посебно внимание посветивме на изборот на транзистори со приближно исти вредности на двата основни параметри (I_{DSS} , V_{TH}). Диодниот блок се состоеше од 5 силициумски диоди. Како што се гледа, резултатите од мерењата се во согласност со нашите очекувања, со тоа што во случајот на Сл. 2. отстапувањата се сепак забележителни (се чини дека однесувањето на транзисторите од типот BF245B не е во задоволителна согласност со разгледаните модели), а во случајот на Сл. 3 тие се така мали што веројатно се само резултат на неидентичноста на карактеристиките на употребените транзистори (подеднакво добри резултати добивме и при меѓусебна измена на местата на транзисторите J_2 и J_3). Заради покомплетно презентирање на добиените резултати, во Таб. 1 ги даваме точните нумерички вредности на некои од податоците врз основа на кои е добиен дијаграмот на Сл. 3. Во неа се дадени и соодветните вредности на напонот U_C .

Излезната отпорност на разгледуваното струјно огледало е одредена практично со стрмината на излезните карактеристики на спојниот фет во работното подрачје. Измерените вредности и во двата случај се движеле од 50 до 100 $k\Omega$.



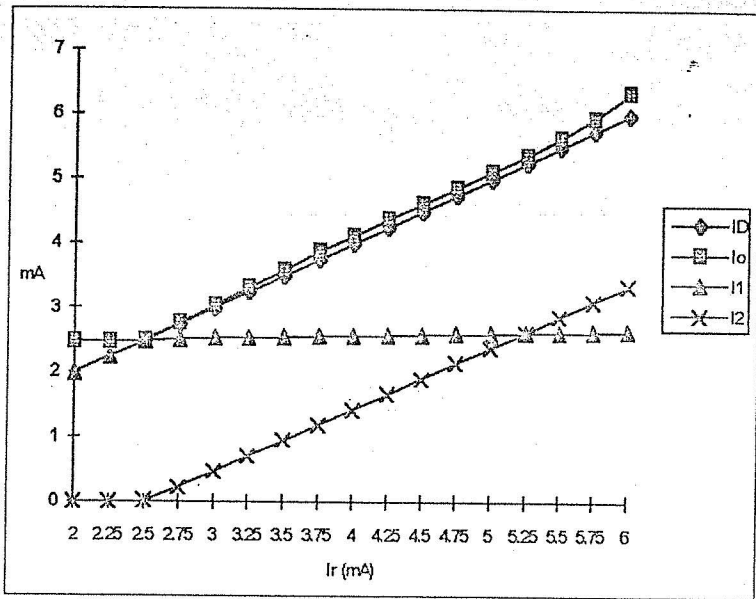
a)



b)

Сл. 2. Резултати од извршени мерења на дискретен прототип на колото од Сл. 1-b со транзисторот BF245B. Со I_D е означена идеалната вредност на излезната струја I_0 .

- a) J_1 ($I_{DSS} = 6.55$ mA, $V_{TH} = -2.80$ V); J_2 ($I_{DSS} = 6.95$ mA, $V_{TH} = 3.00$ V);
 J_3 ($I_{DSS} = 6.66$ mA, $V_{TH} = -2.94$ V). Отстапувањето на I_0 од I_r во
 подрачјето од $I_r = 7.5$ mA до $I_r = 12.5$ mA се движи од +3.1 % до -8.2 %.
- b) J_1 ($I_{DSS} = 6.66$ mA, $V_{TH} = -2.94$ V); J_2 ($I_{DSS} = 6.95$ mA, $V_{TH} = -3.00$ V);
 J_3 ($I_{DSS} = 6.55$ mA, $V_{TH} = -2.80$ V). Отстапувањето на I_0 од I_r во
 подрачјето од $I_r = 7.5$ mA до $I_r = 10.5$ mA се движи од +5.6 % до 2.8 %.
 (параметарот I_{DSS} е мерен при $U_{DS} = 3$ V, а параметарот V_{TH}
 при $U_{DS} = 3$ V и $I_D = 10$ μ A)



Сл. 3. Резултати од извршени мерења на дискретен прототип на колото од Сл. 1-а со транзисторот BC264A

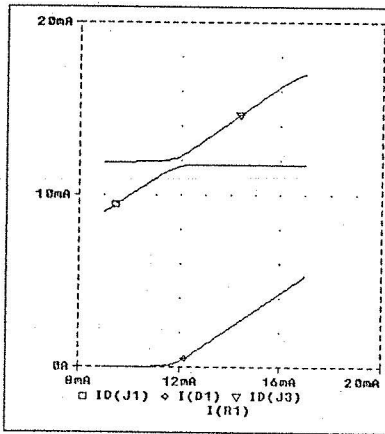
J_1 ($I_{DSS} = 2.94 \text{ mA}$, $V_{TH} = -1.09 \text{ V}$); J_2 ($I_{DSS} = 2.86 \text{ mA}$, $V_{TH} = -0.95 \text{ V}$);
 J_3 ($I_{DSS} = 3.00 \text{ mA}$, $V_{TH} = -0.99 \text{ V}$) (параметарот I_{DSS} е мерен при $U_{DS} = 5 \text{ V}$, а параметарот V_{TH} при $U_{DS} = 5 \text{ V}$ и $I_D = 10 \mu\text{A}$). Отстапувањето на I_o од I_r во подрачјето од $I_r = 2.5 \text{ mA}$ до $I_r = 5.75 \text{ mA}$ се движи од -0.4% до $+3.4\%$.

Табела 1. Резултати од извршени мерења на дискретен прототип на колото од Сл.1-б со транзисторот BC264A. J_1 ($I_{DSS} = 2.94 \text{ mA}$, $V_{TH} = -1.09 \text{ V}$); J_2 ($I_{DSS} = 2.86 \text{ mA}$, $V_{TH} = -0.95 \text{ V}$); J_3 ($I_{DSS} = 3.00 \text{ mA}$, $V_{TH} = -0.99 \text{ V}$)

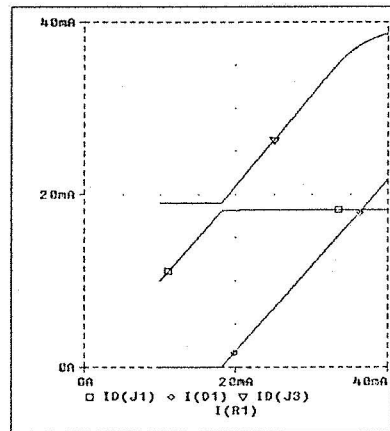
I_r (mA)	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
I_o (mA)	2.47	2.49	3.04	3.58	4.11	4.61	5.11	5.65	6.34
I_1 (mA)	2.00	2.48	2.53	2.55	2.57	2.59	2.61	2.63	2.65
I_2 (mA)	0.00	0.02	0.47	0.95	1.43	1.91	2.39	2.87	3.35
U_c (V)	0.00	0.00	0.13	0.25	0.36	0.46	0.55	0.62	0.67

5. Симулација

На Сл.4 се прикажани резултатите од две извршени симулирања на колото од Сл. 1-b со програмата SPICE. Отстапувањето на I_o од I_r во работното подрачје, во случајот (B) е нешто позабележително, но за одбележување е дека и во двата случаи се работи за речиси строго линеарна зависност меѓу I_o од I_r . Споредувајќи ги кривите добиени по пат на мерење со кривите добиени по пат на симулација, забележуваме квалитативна разлика меѓу нив во областа десно од горната граница на работното подрачје (над $U_C = V_\delta = 0.6 \text{ V}$). Во првиот случај градиентот на кривата $I_o = I_o(I_r)$ се зголемува, а во вториот се намалува.



(a)



(b)

Сл. 4. Симулација на зависноста на излезната струја $I_D(J3) \equiv I_o$, на струјата низ првиот транзистор $I_D(J1) \equiv I_1$ и на струјата низ диодите $I(D1) \equiv I_2$ од референтната струја $I(R1) \equiv I_r$ кај колото од Сл. 1-b:

- A) Транзистор: J2N3819 ($I_{DSS} \approx 11.9 \text{ mA}$, $V_{TH} \approx -3.0 \text{ V}$). Претпоставен е блок од 5 силициумски диоди. Отстапувањето на I_o од I_r во подрачјето од $I_r = 12.0 \text{ mA}$ до $I_r = 16.0 \text{ mA}$ се движи од +2 % до +1.5%.
- B) Транзистор: J2N4393 ($I_{DSS} \approx 19.0 \text{ mA}$, $V_{TH} \approx -1.4 \text{ V}$). Претпоставен е блок од 3 силициумски диоди. Отстапувањето на I_o од I_r во подрачјето од $I_r = 18.4 \text{ mA}$ до $I_r = 33.0 \text{ mA}$ се движи од +4.8% до +5.2%.

6. Заклучок

Во трудот е покажано дека шемата на Сл. 1-b претставува, во одредено подрачје, идеално струјно огледало и тоа како според моделот на Скичман и Ходжис, така и според природниот модел на спојниот фет. Мерењата извршени врз реализиран дискретен прототип како и извршените симулации сугерираат дека во рамките на монолитната интегрирана технологија е можна реализација на практично употребливи струјни огледала врз база на анализираната шема.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] N. Kotera, K. Yamashita, K. Kitamura and Y. Hatta, "Constant-Current Circuit Biasing Technology for GaAs FET IC", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. SC30, no 1, pp. 61-64, Jan. 1995

REALIZATION OF A CURRENT MIRROR CIRCUIT USING JFET'S

Keywords: Current mirror, JFET

Abstract: A new current mirror circuit (CM), based on JFET's, has been proposed and analyzed. It is assumed that the transistors used are practically identical, which can be easily achieved in the integrated-circuit technology. The experimentally observed CM characteristics of several discrete prototype samples are presented. SPICE simulations have confirmed the expected results.