

УДК 621.381.2

ФИЗИКА

Член-корреспондент АН Армянской ССР Г. М. Авакьянц

## Об активных ячейках на основе моп-структуры и биполярного транзистора

(Представлено 11/X 1972)

Рассмотрим систему, состоящую из МОП—структуры с индуцированным каналом  $p$ -типа проводимости и последовательно подключенного со стороны стока к ней сопротивления  $R$  (рис.1) (именуемой в последующем  $S$ —ячейкой). Как видно из рисунка эта схема отличается от обычного МОП-транзистора: 1) затвор подключается к стоку, а не к истоку; 2) затвор соединяется со стоком не только через источник эдс  $E$ , но и через сопротивление  $R$ ; 3) потенциал подаваемый от источника эдс  $E$ , на затвор не отрицательный, а положительный.

Обратимся к ВАХ описанной ячейки между точками  $A$  и  $B$  (рис. 1,  $a$ ).

Пусть разность потенциалов между ними сначала равна нулю. Это значит, что равен нулю и ток через сопротивление  $R$ . В то же время на затворе имеется положительный потенциал  $E$ . Естественно, этот потенциал противодействует образованию проводящего канала под пленкой диэлектрика.

По мере увеличения разности потенциалов между точками  $A$  и  $B$ , потенциал на затворе сначала становится все меньше, а затем меняет знак. Если разность потенциалов между  $A$  и  $B$  обозначить через  $U_a$ , то на затворе величина потенциала равна:

$$E - U_a - IR, \quad (1)$$

где  $I$ —значение тока, текущего от истока к стоку. Пока (1) положительно, ток через прибор практически равен нулю. Только когда (1) станет отрицательным и превзойдет по абсолютной величине некоторую величину  $U_0$ , канал окажется проводимым настолько, что для описания тока через него можно будет и использовать известные соотношения из теории МОП—транзистора (<sup>1</sup>).

Таким образом, если потенциал на затворе становится все более отрицательным под затвором возникает канал  $p$ -типа проводимости, раньше у истока, потом у стока. Пока канал не образовался по всей

длине между стоком и истоком мы имеем дело с режимом насыщения. В этом случае ток между точками  $A$  и  $B$ , согласно известной теории МОП-транзисторов, равен (1):

$$I = \frac{kU_3^2}{2}, \quad (2)$$

где:

$$k = \frac{\epsilon_i \mu d}{4\pi L w}. \quad (3)$$

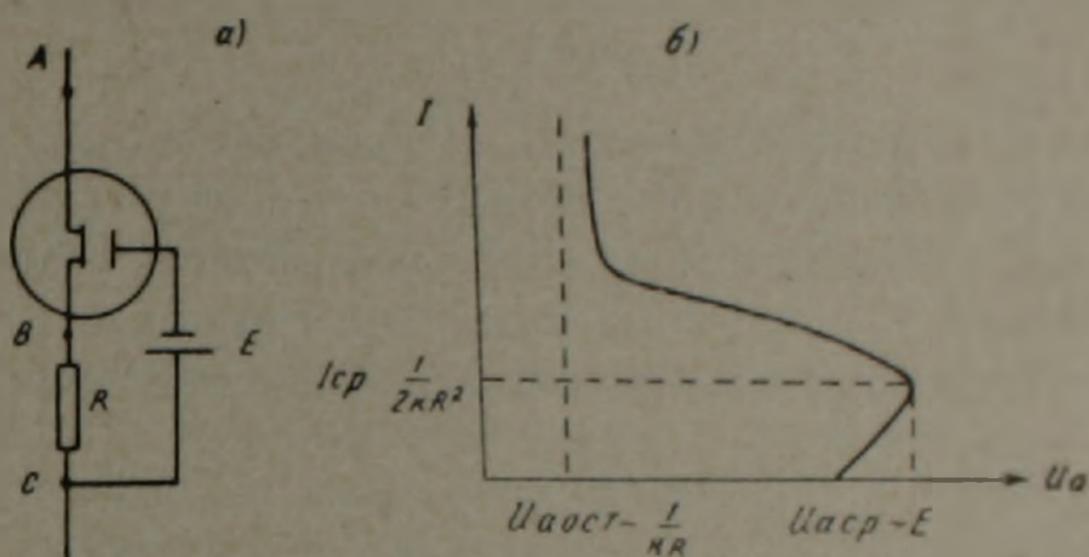


Рис 1

Здесь  $L$  — расстояние между истоком и стоком (длина канала, когда он полностью существует),  $w$  — толщина слоя диэлектрика,  $d$  — ширина канала,  $\mu$  — подвижность дырок,  $U_3$  — напряжение на затворе,  $\epsilon_i$  — диэлектрическая постоянная изолятора.

Формула (2) применима, когда величина (1) уже отрицательна так, что:

$$U_3 = U_a + IR - E. \quad (4)$$

Подставляя (2) вместо  $U_3$  правую часть (4), получаем:

$$I = \frac{k}{2} (U_a + IR - E)^2. \quad (5)$$

Эту формулу можно также переписать и в виде:

$$U_a = E + \sqrt{\frac{2I}{k}} \left( 1 - \sqrt{\frac{I k R^2}{2}} \right). \quad (6)$$

Из (6) хорошо видно, что при малых токах  $U_a$  растет с ростом тока, а затем падает. Таким образом (6) показывает, что ВАХ ячейки между точками  $A$  и  $B$  имеет участок отрицательного сопротивления. Причем, точка, в которой происходит переход с положительной ветви на отрицательную ветвь ВАХ (точка срыва), характеризуется следующими параметрами:

$$U_{аср} = E + \frac{1}{2kR}, \quad (7)$$

$$I_{cp} = \frac{1}{2 k R^2} \quad (8)$$

Примечательной особенностью полученных результатов является тот факт, что напряжение срыва,  $U_{аср}$ , при:

$$E \gg \frac{1}{2 k R} \quad (9)$$

не зависит практически от физических, геометрических и технологических параметров МОП-структуры так, что:

$$U_{аср} \approx E. \quad (10)$$

С дальнейшим ростом разности потенциалов между точками  $A$  и  $B$ , а значит, с дальнейшим увеличением отрицательного потенциала на затворе, канал открывается по всей длине между стоком и истоком. МОП-структура при этом переходит в насыщенный режим, и величина проходящего тока через канал описывается уже формулой (1):

$$I = k U_a \left( U_3 - \frac{U_a}{2} \right) \quad (11)$$

или учитывая (4):

$$I = k U_a \left( \frac{U_a}{2} + IR - E \right). \quad (12)$$

Это последнее выражение можно переписать в виде:

$$I = \frac{\left( E - \frac{U_a}{2} \right) k U_a}{k R U_a - I}. \quad (13)$$

Из (13) видно, что после срыва на ВАХ  $S$ -ячейки появляется участок вертикали так, что по мере приближения напряжения к величине:

$$U_{доот} = \frac{1}{k R} \quad (14)$$

ток через прибор неограниченно возрастает. Причиной такой зависимости является очень быстрое возрастание проводимости канала с ростом потенциала на затворе, который в свою очередь быстро возрастает с ростом тока через систему. В этом лежит и физическая причина появления  $S$ -образного участка на ВАХ ячейки ибо, как мы видим, имеется положительная обратная связь между током через канал и нарастающим отрицательным потенциалом на затворе. Качественная ВАХ показана на рис. 1,б.

Рассмотренной  $S$ -ячейки будут присущи все те преимущества, которые характерны для МОП-структур. Это: малые потребляемые

мощности, большое быстродействие, высокая температурная стабильность, простота технологии, полностью совпадающая с технологией производства МОП-транзисторов. Указанное выгодно отличает рассматриваемый прибор от других  $S$ -структур (2).

Полученная нами формула для  $U_{аср}$  (см. (7) и (10)) — показывает значительную нечувствительность напряжения включения приборов к разбросу параметров отдельных элементов при их интегральном исполнении на одной пластине, разумеется при реализации обычной технологии, обеспечивающей применимость формулы (2) и выполнения неравенства (9).

Из (10), (14) и (9) следует большая величина отношения

$$U_{аср}/U_{асст}$$

Как не трудно видеть,  $S$ -ячейку аналогичную рассмотренной можно получить также на основе униполярного транзистора с  $p-n$ -переходом.

Изложенный принцип получения переключающей ячейки на основе транзистора и последовательно с ним соединенного сопротивления может быть распространен и на биполярный транзистор.

Теперь сопротивление  $R$  подключается в цепь коллектора, а источник  $E$  падает, смещающее переход в обратном направлении, напряжение между базой и коллектором (последний включает в себя в данном случае и сопротивление  $R$ ).

Если мы зададим ВАХ эмиттерного перехода в виде:

$$I \approx I_s (e^{\frac{U_э}{T}} - 1), \quad (15)$$

где  $U_э$  — напряжение между базой и эмиттером ( $T$  — измеряется в единицах напряжения), то нетрудно убедиться, что пока  $U_a + \alpha R I < E$ , ячейка практически будет заперта и лишь при:

$$U_э = U_a + \alpha R I - E > 0 \quad (16)$$

между точками  $A$  и  $C$  потечет заметный ток.

Здесь  $U_a$  — напряжение между точками  $A$  и  $B$ ,  $\alpha$  — коэффициент передачи тока от эмиттера к коллектору.

Согласно (15) и (16) ячейка откроется при напряжении:

$$U_{аср} = E + T \ln \left( \frac{I_{ср}}{I_s} + 1 \right) - \alpha R I_{ср}, \quad (17)$$

где ток срыва:

$$I_{ср} = \frac{I}{\alpha R}. \quad (18)$$

если  $E \gg T$  то  $U_{аср} \approx E$ .

Примерный вид полной ВАХ — ячейки между точками  $A$  и  $B$  описывается совокупностью формул:

$$U_a = E - [\alpha I + A_1(1 - e^{-\frac{U_k}{T}})]R + \\ + T \ln \left| \frac{I}{I_s} + \alpha \frac{\alpha R I - E + U_k}{A_1 R} + 1 \right|, \quad (19)$$

$$U_k = E - [\alpha I + A_1(1 - e^{-\frac{U_k}{T}})]R = E - I_k R, \quad (20)$$

$U_k$  — напряжение на коллекторе.

При больших токах, как и в случае МОП — структуры, возникает вертикаль, причем остаточное напряжение,  $U_{a\text{ост}}$  вообще говоря, оказывается значительно меньше  $T$ . Так, в случае диффузионного транзистора с короткой базой ( $D \ll L_p$ ),  $\gamma = 1$  (3)

$$\alpha \approx 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{d}{L_p} \right)^2, \quad I_s \approx \frac{D_p P_n}{d}, \quad A_1 \approx I_s \left( \frac{d}{L_p} \right)^2,$$

мы получаем ( $I \rightarrow \infty$ )

$$U_{a\text{ост}} \approx \frac{1}{2} \left( \frac{d}{L_p} \right)^2 T. \quad (21)$$

Величина  $U_{a\text{ост}}$  при увеличении тока  $I$  может стать, вероятно, отрицательной, если ток через коллекторный переход будет увеличиваться с приложенным к коллектору напряжением по закону более медленному, чем через эмиттерный переход.

Отрицательное значение  $U_k$  является следствием инверсии напряжения на коллекторе, первоначально смещенного в обратном направлении. Ток, при котором напряжение на коллекторе обращается в нуль равен:

$$I_1 = \frac{E}{\alpha R}, \quad (22)$$

В (4) была рассмотрена активная ячейка, состоящая из биполярного транзистора в диодном включении, база которого закорочена с эмиттером через тунельный диод так, что последний имеет свою обычную  $N$  — образную ВАХ при прямом смещении на эмиттере.

Там же указывалось, что кроме того база с коллектором в этой системе может быть закорочена сопротивлением  $R$ .

Для такой структуры, на основе тех приближенных уровней, которые были приведены в (4), дифференциальное сопротивление имеет вид ( $n = 1$ ):

$$\frac{dV}{dI} = R \frac{R^{-1} + (1 - \alpha) \frac{B}{T} e^{\frac{V_1}{T}} + A_1 \alpha e^{\alpha V_1} + C(A - 2V_1)}{\frac{B}{T} e^{\frac{V_1}{T}} + A_1 \alpha e^{\alpha V_1} + C(A - 2V_1)} \quad (23)$$

(обозначения см. в (3)). Из (15) следует, что если:

$$R^{-1} > \frac{B}{T} e^{\frac{V_1}{T}}, \quad (24)$$

то раньше, с ростом  $V_1$ , обращается в нуль знаменатель, а при обратном неравенстве раньше обращается в нуль числитель (2). В общем случае теоретическая ВАХ этой активной ячейки будет содержать две точки, где  $\frac{dV}{dI} = 0$  и две точки с  $\frac{dV}{dI} = \infty$ .

Таким образом, рассмотренная система характеризуется большим разнообразием ВАХ, которые будут занимать диапазон от „чистой“  $N$ -характеристики до „чистой“  $S$ -характеристики. Очевидно, что всё то же самое можно сказать, если туннельный диод будет заменен на любой другой элемент с  $N$ -образной ВАХ, как об этом уже указывалось в (1). В частности, как известно, на основе двух МОП-транзисторов можно создать ячейку с  $N$ -характеристикой (5). Следовательно, заменяя туннельный диод на два МОП-транзистора можно в сочетании с биполярным транзистором получить структуру, дифференциальное сопротивление которой будет аналогично (23).

Институт радиофизики и электроники  
Академии наук Армянской ССР

Հայկական ՍՍՀ ԳԱ քղրակից-անդամ Գ. Մ. ԱՎԱԳՅԱՆՑ

ՄՕԿ ստրուկտուրայից կամ բիպոլյար տրանզիստորից բաղկացած ակտիվ բջիջների մասին

Առաջարկվում է ՄՕԿ ստրուկտուրայի կամ բիպոլյար տրանզիստորի և դիմադրության միացման այնպիսի սխեմա, որը ապահովվում է կիսահաղորդչային սարքի  $S$ -բնութագիծը: Հաշվված են խզման կետի հոսանքն ու լարումը, ինչպես նաև սարքերի մնացորդային լարումը:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А — Գ Ր Ա Վ Ա Ն Ո Ւ Ք Յ Ո Ւ Ն

- <sup>1</sup> Полевые транзисторы. Перевод с английского. Изд. «Советское радио», М., 1972.  
<sup>2</sup> Г. М. Авакьянц, В. М. Арутюнян, Р. С. Барсегян, ДАН Арм. ССР, т. 53, № 4, (1972). <sup>3</sup> Р. П. Нанавати, Введение в полупроводниковую электронику. Изд. «Связь», М., 1965. <sup>4</sup> Г. М. Авакьянц, ДАН Арм. ССР (в печати). <sup>5</sup> В. В. Малин, М. С. Сонин, Параметры и свойства полевых транзисторов. Изд. «Энергия», 1967.