

УДК 621.3.049

Л.А. Торгонский

К оптимизации выбора емкости затвора транзисторов КМДП вентиляй

Показана возможность оптимизации выбора удельной емкости затвора транзисторов вентиля КМДП структуры по критерию минимума энергии переключения.

Вентиля на взаимодополняющих (КМДП) транзисторах со структурой металл–диэлектрик–полупроводник (рис. 1) являются базисными элементами современных микросхем. Низкое энергопотребление в статических состояниях является несомненным достоинством таких вентиляй. В современных условиях повышения степени интеграции снижение энергии переключения вентиляй остается актуальной задачей проектирования микросхем.

Энергетические соотношения для вентиляй КМДП структуры рассматривались в ряде работ и в обобщенном виде приведены в [1].

В оценках энергопотребления [1] полагается учет емкостной нагрузки (C_h) вентиляя, не зависящий от емкости затвора транзисторов вентиляя. Между тем нагрузкой вентиляя цифровых устройств являются им подобные вентиляя, емкости затворов которых образуют суммарную емкость нагрузки C_h . Без учета знака пороговое напряжение (U_0) переключающего ($VT2$) и нагрузочного ($VT1$) транзисторов (см. рис. 1), представляются выражением общего вида и зависят от удельной емкости затворной цепи C_o .

$$U_0 = B1/C_o + B2. \quad (1)$$

Численное значение коэффициента $B1$ в выражении (1) определяется алгебраической суммой плотностей пространственного заряда Q_p полупроводниковой базы прибора и заряда поверхностных состояний Q_s на границе затворного диэлектрика с базой. Численное значение коэффициента $B2$ определяется разностью работ выхода материала затвора и подложки (с за-вышением на удвоенное значение электрохимического потенциала подложки). Значения коэффициентов $B1$ и $B2$ зависят от степени легирования полупроводниковой пластины. Применение в качестве электродного материала затворов легированного поликремния с типом проводимости, противоположным типу проводимости канала, позволяет создавать взаимодополняющие транзисторы с пропорционально связанными пороговыми напряжениями при равной удельной емкости C_o обоих транзисторов вентиляя.

Напряжение E питания КМДП-вентиляя определяется значениями пороговых напряжений переключающего и нагрузочного транзисторов по условию

$$E \leq |U_{01}| + |U_{02}| - |\Delta U|, \quad (2)$$

где U_{01} , U_{02} – пороговые напряжения транзисторов $VT1$, $VT2$ соответственно; ΔU – проектный запас по перекрытию пороговых напряжений.

Допуская объективную приемлемость соотношений пропорциональности между напряжениями

$$|U_{01}| \approx m \cdot |U_{02}|; |\Delta U| \approx k \cdot |U_{02}|, \quad (3)$$

где коэффициенты пропорциональности принимаются в диапазонах $1 \leq m \leq 2$ и $0,2 \leq k \leq 0,5$ при проектировании, выражение (2) можно представить в иной форме:

$$E \leq (m+1-k) \cdot U_{02}. \quad (2a)$$

При напряжении питания вентиляя соответствующем условию (2a) сквозной ток через транзисторы отсутствует, так как входному напряжению открывания одного из транзисторов взаимодополняющей пары соответствует входное напряжение, недостаточное для открывания другого [повышение напряжения питания относительно ограничения (2a) более чем на ΔU сокращает время переключения ценой увеличения рассеиваемой мощности].

Ток заряда (разряда) емкостей вентиляя за время переключения на фронте (срезе) переключения может быть приближенно представлен треугольником с высотой I_{max} и среднее значение потребляемой при переключении вентиляя мощности можно оценить по формуле

$$P_{cp} \approx E \cdot I_{max}/2. \quad (4)$$

Среднее время переключения инвертора, соответствующее времени заряда (разряда) параллельно включенных емкостей затворов переключающего и нагрузочного транзисторов C_Σ , может быть оценено по формуле

$$T_\phi \approx 2 \cdot C_\Sigma \cdot E / I_{max}. \quad (5)$$

Энергия переключения инвертора (A) с учетом выражений (4), (5) определяется по формуле

$$A = P_{cp} \cdot T_\phi = E^2 \cdot C_\Sigma \quad (6)$$

и не зависит от зарядно-разрядного тока (I_{max}) стока транзисторов вентиляя.

Полагая площади затворов нагрузочного и переключающего транзисторов каждого из N нагрузжающих инверторов равными S_3 , зависимость напряжения E от пороговых напряжений по

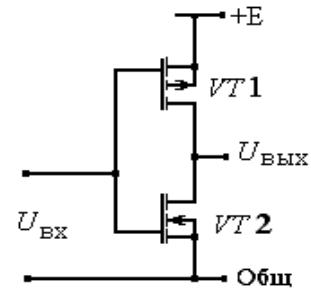


Рис. 1

условию (2а) и зависимость порогового напряжения от определяющих параметров структуры по равенству (1), выражение (6) можно преобразовать к виду

$$A = (2+N) \cdot S_3 \cdot (m+1-k)^2 \cdot [(B1)^2 / Co. + 2 \cdot B1 \cdot B2 + (B2)^2 \cdot Co]. \quad (6a)$$

Согласно выражению (6а), энергия (работа) переключения КМДП вентиля обретает минимальное значение при выполнении условия

$$Co = B1 / B2, \quad (7)$$

когда, согласно уравнению (1)

$$B2 = 0,5 \cdot U_{02}.$$

При этом минимальное значение работы переключения определяется по выражению

$$A_{min} = 4 \cdot (2+N) \cdot S_3 \cdot (m+1-k)^2 \cdot B1 \cdot B2, \quad (8)$$

и, при прочих равных условиях работа переключения A_{min} снижается при уменьшении площади затвора, при сокращении числа дополнительных нагрузок на вентиль ($N \rightarrow 0$), при снижении и выравнивании пороговых напряжений транзисторов, при снижении значения зарядного коэффициента $B1$.

Результатом проведенного исследования является достаточно наглядный результат, позволяющий, с одной стороны, рационализировать выбор параметров структуры КМДП вентиля, а с другой стороны применять полученные соотношения к оценке потенциальных свойств вентиля с учетом возможных усложнений модели.

Полученная форма описания позволяет проводить оценку потенциальных показателей вентиляй в условиях ограничений степени интеграции и отводимой мощности от кристаллов в больших интегральных схемах (БИС). Так, при $B1 = 10^{-8}$ К/см², $U_{02} = 1$ В, $S_3 = 4$ мкм², $N = 2$, $m = 1,5$; $k = 0,3$; $A = 15,4$ ФДж, что при допустимом отводе тепла от кристалла микросхемы 5 Вт, при интеграции 10^6 вент./на кристалле соответствует времени переключения вентиля

$$T\phi \approx (15,4 \cdot 10^{-15} \cdot 10^6 / 5) \geq 3 \text{ нС.}$$

Литература

1. Алексеенко А.Г., Шагурин И.И. Микроэлектроника: Учебное пособие для вузов / Под. ред. И.П. Степаненко. — М.: Радио и связь, 1982.

Торгонский Леонид Александрович

ГОУ ВПО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

К.т.н., доцент кафедры Комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем

Тел.: 413–426.

Эл. почта: tla@keva.tusur.ru.

L.A. Torgonsky

To optimization of a choice of capacity of a shuttertransistors KMDP of gates

The opportunity of optimization of a choice of specific capacity of a shutter of transistors of gate KMDP of structure by criterion of a minimum of energy of switching is shown.