

УДК 621.383.8

Модель усиления тока для резистивно-связанных каналов МКП

А. Б. Беркин, В. В. Васильев

Разработана расчетная модель для определения коэффициента передачи контраста в системе двух резистивно-связанных каналов микроканальной пластины (МКП). Показано влияние входных токов и межканального сопротивления на коэффициент передачи контраста МКП.

PACS: 85.60.Bt

Ключевые слова: модель, контраст, коэффициент передачи.

Введение

Микроканальные пластины широко используются для усиления яркости в электронно-оптических преобразователях. При низкой освещенности коэффициенты усиления тока одинаковы во всех каналах, при этом имеют место режим линейного усиления и неискаженная передача изображения. Однако в режимах, близких к токовому насыщению, каналы с меньшим током имеют большее усиление, что вызывает изменение контраста изображения [1].

Если существует резистивная электрическая связь между каналами, обусловленная конечной величиной сопротивления межканальных промежутков, то усиление тока в отдельном канале становится зависимым от тока в смежных каналах, поэтому перепад тока и контраст передаются через МКП иначе, чем в отсутствие связи.

Цель данной работы — теоретическое исследование эффектов взаимодействия резистивно-связанных каналов в МКП при передаче контраста изображения. Алгоритм решения поставленной задачи, разработанный в [2] и базирующийся на использовании методов теории электрических цепей, применен в данной работе для системы из двух каналов.

Эквивалентная схема связанных каналов. Вывод расчетных соотношений

Разделим канал на N отрезков длиной $dz = l_k/N$ каждый. Представим эквивалентную схему канала N -звенной цепочкой резистивных элементов и генераторов наведенного тока I_1, I_2, \dots, I_N и J_1, J_2, \dots, J_N , как показано на рис. 1. Ток каждого из генераторов равен усредненному в пределах dz значению конвекционного тока в соответствующем отрезке

канала. Входные токи поступают в каналы в сечении $z = 0$ с потенциалом $U = 0$, выходные токи — это токи I_N и J_N в сечении $z = l_k$ с потенциалом $U = U_0$.

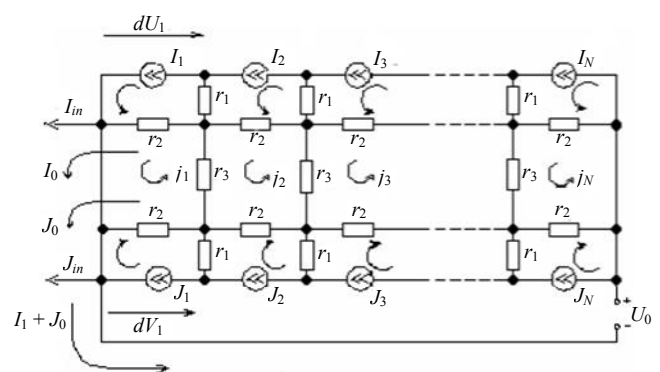


Рис. 1. Эквивалентная схема каналов с распределенной связью

Входными параметрами задачи являются коэффициент усиления в линейном режиме M_0 , напряжение МКП — U_0 , ток на входе в первый (I_{in}) и во второй (J_{in}) каналы, а также сопротивление межканального слоя (распределенная связь).

Пассивные элементы эквивалентной схемы определяются сопротивлениями эмиссионного (R_1) и резистивного (R_2) слоев канала. Для дискретных элементов имеем, соответственно: $r_1 = R_1(N-1)$, $r_2 = R_2/N$. Распределенная связь учтена сопротивлениями $r_3 = R_3/(N-1)$, где R_3 — поперечное сопротивление межканального промежутка.

Для анализа эквивалентной схемы канала в установившемся режиме воспользуемся методом контурных токов, уравнения которых имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} j_1(2 \cdot r_2 + r_3) - I_1 r_2 + J_1 r_2 - j_2 r_3 + (I_0 - J_0) r_2 &= 0; \\ j_i(2 \cdot r_2 + 2 \cdot r_3) - (j_{i-1} + j_{i+1}) r_3 + (I_i - J_i) r_2 - j_2 r_3 + &+ (I_0 - J_0) r_2 = 0; \\ j_N(2 \cdot r_2 + r_1) - j_{N-1} r_3 + (I_N - J_1) r_2 + (I_0 - J_0) r_2 &= 0; \\ I_0 N r_2 - \sum_1^N I_i r_2 + \sum_1^N j_i r_2 &= U_0; \\ J_0 N r_2 - \sum_1^N J_i r_2 - \sum_1^N j_i r_2 &= U_0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Беркин Александр Борисович, доцент.
Васильев Виталий Вадимович, доцент.
Новосибирский государственный технический университет.
Россия, 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.
Тел. 8 (3833) 46-06-19. Факс: 8 (3833) 46-06-75.
E-mail: Berkin@epu.ref.nstu.ru

Статья поступила в редакцию 26 мая 2009 г.

Исключим из этой системы токи I_0 и J_0 , выразив их значения из двух последних уравнений этой системы. Далее запишем выражения для приращений потенциала на каждом участке dz в обоих каналах:

$$\left. \begin{aligned} dU_1 &= \frac{U_0}{N} + \left(\frac{\sum I_i}{N} - I_1 \right) r_2 + (I_2 - I_1) r_1 - \left(\frac{\sum j_i}{N} - j_1 \right) r_2; \\ dV_1 &= \frac{U_0}{N} + \left(\frac{\sum J_i}{N} - J_1 \right) r_2 + (J_2 - J_1) r_1 + \left(\frac{\sum j_i}{N} - j_1 \right) r_2; \\ dU_i &= \frac{U_0}{N} + \left(\frac{\sum I_i}{N} - I_i \right) r_2 + (I_{i-1} - 2I_i + I_{i+1}) r_1 - \left(\frac{\sum j_i}{N} - j_i \right) r_2; \\ dV_i &= \frac{U_0}{N} + \left(\frac{\sum J_i}{N} - J_i \right) r_2 + (J_{i-1} - 2J_i + J_{i+1}) r_1 + \left(\frac{\sum j_i}{N} - j_i \right) r_2; \\ dU_N &= \frac{U_0}{N} + \left(\frac{\sum I_N}{N} - I_N \right) r_2 + (I_{N-1} - I_N) r_1 - \left(\frac{\sum j_i}{N} - j_N \right) r_2; \\ dV_N &= \frac{U_0}{N} + \left(\frac{\sum J_N}{N} - J_N \right) r_2 + (J_{N-1} - J_N) r_1 + \left(\frac{\sum j_i}{N} - j_N \right) r_2, \end{aligned} \right\} (2)$$

а уравнения для контуров с токами j_1, \dots, j_N , протекающими через сопротивления r_3 , представим в виде

$$\left. \begin{aligned} j_1(2r_2 + r_3) - (I_1 - J_1)r_2 - j_2r_3 + \frac{r_2}{N}(s_{i_1} - s_{i_2} - 2s_{i_3}) &= 0; \\ j_i(2r_2 + 2r_3) - (j_{i-1} + j_{i+1})r_3 + (I_i - J_i)r_2 - j_2r_3 + \\ + \frac{r_2}{N}(s_{i_1} - s_{i_2} - 2 \cdot s_{i_3}) &= 0; \\ j_N(2r_2 + r_3) - j_{N-1}r_3 + (I_N - J_N)r_2 - j_2r_3 + \frac{r_2}{N}(s_{i_1} - s_{i_2} - 2s_{i_3}) &= 0, \end{aligned} \right\} (3)$$

где $s_{i_1} = \sum_1^N I_i$; $s_{i_2} = \sum_1^N J_i$; $s_{i_3} = \sum_1^N j_i$.

Решение системы конечно-разностных уравнений (2), (3) позволяет получить распределение тока и потенциала по длине каналов при заданных значениях входных токов.

Алгоритм расчета тока и потенциала для двух связанных каналов

Для получения распределений и потенциалов и токов в каналах следует учесть влияние напря-

женности поля в канале на величину конвекционного тока.

В линейном режиме (при малом токе на входе канала) напряженность электрического поля в канале длиной l_k постоянна и равна $E_0 = U_0/l_k$, а ток распределен по закону экспоненты с инкрементом $(\ln M_0)/l_k$.

В нелинейном режиме напряженность поля в канале становится функцией координаты [1]. Изменение конвекционного тока в сечении z в этом случае пропорционально изменению потенциала на характерной длине пробега электронов между столкновениями со стенкой. Выражение для токов в каналах принимает вид [2]:

$$\left. \begin{aligned} I(z) &= I_{in} \cdot \exp\left(\frac{\ln M_0}{l_k} z\right) \frac{E(z)}{E_0}; \\ J(z) &= J_{in} \cdot \exp\left(\frac{\ln M_0}{l_k} z\right) \frac{E(z)}{E_0}, \end{aligned} \right\} (4)$$

где $E(z)$ — напряженность поля в сечении z канала.

Для получения согласованных распределений тока и потенциала (напряженности поля) в каналах необходимо совместное решение системы уравнений (2), (3) и уравнений (4), в которых корректирующие множители для 1-го и 2-го каналов можно представить в виде:

$$\frac{E(z)}{E_0} = \frac{dU(z)}{U_0} \cdot N; \quad \frac{E(z)}{E_0} = \frac{dV(z)}{U_0} \cdot N.$$

Системы (2)—(4) решаются методом простых итераций с релаксацией. Начальное приближение для приращения потенциала — $dU_i = dV_i = U_0/N$, а начальные значения для токов $I(z)$ и $J(z)$ — в соответствии с (4), где $z = idz$, $i = 1, 2, \dots, N$. Максимальная погрешность вычислений тока и приращения потенциала в каждом сечении не превышает 0,1 %.

Определение коэффициента передачи контраста

Одним из важнейших параметров МКП можно считать коэффициент передачи контраста изображения (Contrast Transfer Function — CTF). Идеальная МКП контраста не изменяет, ее CTF равен единице.

Контраст характеризует соотношение яркости двух близко расположенных элементов изображения. Так как яркость изображения пропорциональна току при прочих равных условиях, то под величиной контраста будем понимать

$$Q = \frac{I - J}{I + J},$$

где I, J — ток 1-го и 2-го каналов, соответственно.

Рассмотрим тривиальные случаи такого определения контраста:

- если перепад токов на выходе такой же, как на входе — $I_{out}/J_{out} = I_{in}/J_{in}$, то $Q_{in} = Q_{out}$, и входной контраст при передаче изображения сохраняется (CTF = 1);

- очевидно, что при равенстве токов в каналах $I_{in} = J_{in}$ входной контраст равен нулю. Коэффициенты усиления каналов будут одинаковы: $M_1 = M_2 = M$, тогда выходной контраст также равен нулю, поскольку $I_{out} = J_{out}$:

$$Q_{out} = \frac{M \cdot (I_{in} - J_{in})}{M \cdot (I_{in} + J_{in})} = 0;$$

- еще один случай сохранения передачи контраста — это режим линейного усиления (малые токи на входе). Коэффициент усиления не зависит от входного тока — $I_{out} = M I_{in}$; $J_{out} = M J_{in}$, перепады токов на входе и выходе одинаковы $I_{out}/J_{out} = I_{in}/J_{in}$;

- изменение контраста следует ожидать в режимах, близких к токовому насыщению. В этих режимах канал с большим током имеет меньшее усиление, чем канал с малым током, поэтому неизбежно ухудшение контраста. Например, $I_{in} = 2J_{in}$, $M_1 = 400$, $M_2 = 600$.

$$Q_{in} = \frac{2 \cdot J_{in} - J_{in}}{2 \cdot J_{in} + J_{in}} = \frac{1}{3};$$

$$J_{out} = 600 \cdot J_{in}; \quad I_{out} = 400 \cdot I_{in} = 400 \cdot 2 \cdot J_{in};$$

$$Q_{out} = \frac{I_{out} - J_{out}}{I_{out} + J_{out}} = \frac{2 \cdot 400 \cdot J_{in} - 600 \cdot J_{in}}{2 \cdot 400 \cdot J_{in} + 600 \cdot J_{in}} = \frac{200}{1400} = \frac{1}{7}.$$

Как видно, контраст снизился, т. е. $CTF = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{3}{7} = 0,42$.

Анализ влияния распределенной связи на передачу контраста

Расчеты проводили для МКП с диаметром канала 6 и 10 мкм при следующих начальных условиях: напряжение МКП $U_0 = 800$ В; коэффициент усиления в линейном режиме $M_0 = 1000$; ток источника питания в расчете на один канал $I = 10^{-12}$ А; сопротивление пластины $2 \cdot 10^8$ Ом.

Переменным параметром задачи является сопротивление R_3 , величина которого рассчитывается путем интегрирования по сечению межканального промежутка [3]. Минимально допустимое поперечное сопротивление последнего было полу-

чено из следующего условия: ток проводимости, протекающий через межканальный промежуток, составляет не более 3 % от тока, протекающего через резистивный слой R_2 . Это сопротивление составило $\sim 10^{12}$ Ом. При таком минимальном поперечном сопротивлении степень резистивной связи между каналами максимально возможная.

На рис. 2 представлена зависимость CTF от величины входного тока I_{in} для различных значений контраста на входе МКП и сопротивления R_3 .

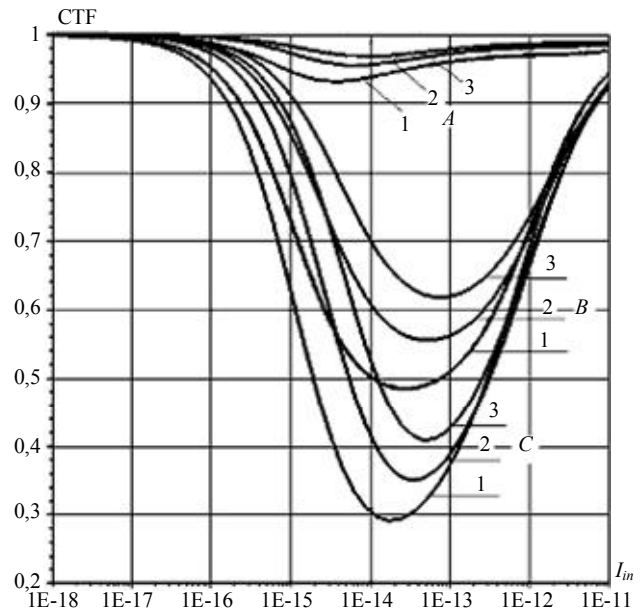


Рис. 2. Зависимость передачи контраста МКП от входного тока канала:

1 — $R_3 = 10^{12}$ Ом; 2 — $R_3 = 10^{14}$ Ом; 3 — $R_3 = 10^{16}$ Ом;
A — $Q_{in} = 0,2$; B — $Q_{in} = 0,667$; C — $Q_{in} = 0,818$

Заметное изменение контраста наблюдается при $R_3 < 10^{15}$ Ом, при $R_3 > 10^{16}$ Ом каналы можно считать несвязанными, они работают как независимые. Минимум на кривых наблюдается при переходе к нелинейному режиму усиления МКП, связанному с токовым насыщением в канале. Максимальная потеря коэффициента передачи контраста может достигать 60 % для несвязанных каналов. В области глубокого насыщения ($I_{in} \sim 10^{-12}$ А) контраст на выходе МКП возрастает, CTF достигает величины 0,8 и практически не зависит от контраста на входе, однако ток источника при $R_3 \sim 10^{11}$ Ом возрастает практически в два раза.

Подробнее начальный участок зависимости $CTF(I_{in})$ для отношения токов на входе каналов, равным двум ($I_{in} = 2J_{in}$), показан на рис. 3.

При сильной связи, когда $R_3 = 10^{12}$ Ом, CTF снижается всего на 5 % при больших входных токах. Наблюдаемая картина объясняется изменением коэффициентов усиления в связанных каналах в зависимости от величины сопротивления рас-

пределенной связи. С увеличением последней коэффициенты усиления для двух каналов сближаются, что приводит к лучшему сохранению контраста. Так, при достижении $R_3 = 10^{12}$ Ом разница между коэффициентами усиления не превышает 1 % для $I_{in} = 10^{-15}$ А и 0,1 % — для $I_{in} = 10^{-16}$ А. Соответственно, в этом случае распределение электрического поля для обоих каналов практически одинаково.

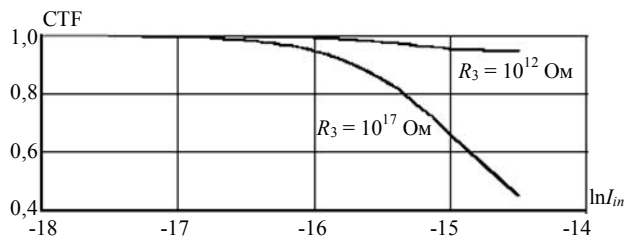


Рис. 3. Зависимость CTF от изменения входных токов при слабой и сильной связях между каналами

Заключение

Представлена расчетная модель для определения значения коэффициента передачи контраста

МКП в системе двух связанных каналов. Модель учитывает сопротивление МКП, входной контраст и режим усиления тока в каналах.

Показано, что усиление резистивной связи между каналами за счет уменьшения сопротивления межканальной перемычки приводит к улучшению передачи контраста изображения в нелинейном режиме работы МКП.

Максимальное ухудшение передачи контраста наблюдается при входных токах в канал МКП, соответствующих переходу от линейного к нелинейному режиму усиления.

Предлагаемая модель будет полезна как при разработке технологии изготовления МКП, так и при выборе режима ее работы в составе ЭОП.

Литература

1. Беркин А. Б., Васильев В. В.// Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. № 15. С. 75–79.
2. Беркин А. Б., Васильев В. В.// Прикладная физика. 2006. № 2. С. 98–102.
3. Беркин А. Б., Васильев В. В.// Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 5. С. 65–68.

Model of current amplification for the conductive connected MCP channels

A. B. Berkin, V. V. Vasilyev

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marks str., Novosibirsk, 630092, Russia
E-mail: Berkin@epu.ref.nstu.ru

A computing model for calculation of the contrast transfer factor parameter in system of two conductive connected MCP channels is created by the methods of the theory of electrical circuits. The influence of input currents and interchannel resistance on transfer contrast factor parameter of MCP is shown.

PACS: 85.60.Bt

Keywords: model, contrast, Contrast Transfer Function (CTF).

Bibliography — 3 references.

Received May 26, 2009