

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.383.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАНАЛОВ МИКРОКАНАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ НА КОНТРАСТ ИЗОБРАЖЕНИЯ

© 2008 г. А. Б. Беркин, канд. техн. наук; В. В. Васильев, канд. техн. наук

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

E-mail: Berkin@epu.ref.nstu.ru

С использованием методов теории электрических цепей исследовано влияние сопротивления межканального промежутка микроканальной пластины, а также сопротивления и положения проводящей перемычки между каналами на коэффициенты усиления тока в каналах с резистивной связью и передачу контраста изображения.

Коды OCIS: 230.0230.

Поступила в редакцию 19.06.2007.

Расширение динамического диапазона преобразования яркости прибора ночного видения для обеспечения высокого разрешения при высокой освещенности возможно за счет улучшения частотно-контрастной характеристики прибора при выборе оптимального режима работы микроканальной пластины (МКП) [1, 2].

Неискаженная передача контраста изображения через МКП наблюдается при равных коэффициентах усиления тока во всех каналах. Однако в режимах, близких к токовому насыщению, каналы с меньшим током имеют большее усиление. Это вызывает изменение перепада токов при его передаче через МКП, а следовательно, и контраста.

Эффект изменения контраста усиливается, если имеется резистивная электрическая связь между каналами. 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. Резистивная связь между каналами может быть обусловлена конечной величиной сопротивления межканальных промежутков или же технологическими дефектами в виде проводящих перемычек. Чтобы выявить эффекты взаимодействия связанных каналов, необходимо рассчитать взаимно согласованные распределения тока и потенциала по длине каналов и определить тем самым выходные токи при заданных их значениях на входе каналов.

Постановка задачи

Алгоритм решения поставленной задачи, разработанный ранее [3] и базирующийся на использо-

вании методов теории электрических цепей, применен в данной работе для системы из двух каналов. Отдельный канал рассматривается как активная одномерная среда с равномерно распределенным по длине усилением. Дискретизация задачи проводится путем замены непрерывных функций координаты ступенчатыми. Канал представляется n -звенной цепочкой источников тока и резистивных элементов, как показано на рис. 1, для системы из двух связанных каналов. Каждое звено цепочки отображает отрезок канала длиной $dz = L/n$, где L – длина канала, а ток каждого источника есть усредненное в пределах dz значение конвекционного тока.

Входной ток втекает в канал в сечении $z = 0$, выходной ток канала – ток в сечении $z = L$ с потенциалом U_0 . Резистивные элементы эквивалентной схемы определяются сопротивлениями окружающих канал слоев диэлектрика: поперечным сопротивлением эмиссионного слоя R_1 , продольным сопротивлением резистивного слоя R_2 и поперечным сопротивлением R_3 межканального промежутка.

Расчет распределения тока и потенциала в каналах проводится методом простых итераций с релаксацией и включает в себя:

а) определение приращений потенциала du_i и dv_i из уравнений для контурных токов при заданных значениях тока источников I_i и J_i ($i = 1, 2, \dots, n$);

б) корректировку тока источников

$$I_i = I_{in} \exp\left(\frac{i}{n} \ln M_0\right) \frac{du_i}{U_0} n, \quad (1)$$

$$J_i = J_{in} \exp\left(\frac{i}{n} \ln M_0\right) \frac{dv_i}{U_0} n.$$

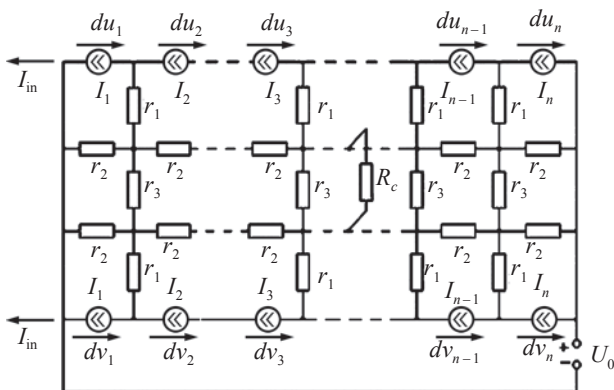


Рис. 1. Эквивалентная схема каналов с резистивной связью, где $r_1 = R_1(n-1)$, $r_2 = R_2/n$, $r_3 = R_3(n-1)$, а R_c – сопротивление проводящей перемычки, расположенной в некотором j -сечении.

В качестве начального приближения принимается линейное распределение потенциалов с приращением $du_i = dv_i = U_0/n$. При этом, как видно из (1), распределение токов становится экспоненциальным с инкрементом, определяемым коэффициентом усиления (M_0) в линейном режиме, одинаковым для обоих каналов. При корректировке токов предполагается, что усиление тока на единицу длины пропорционально коэффициенту вторичной эмиссии электронов, который в свою очередь для энергий первичных электронов, характерных для МКП, пропорционален напряженности поля в канале [4].

Представленные ниже результаты расчетов относятся к каналам со следующими параметрами: $L = 400$ мкм, диаметр каналов $d_k = 10$ мкм, толщина эмиссионного слоя $0,01$ мкм, толщина резистивного слоя $0,2$ мкм, напряжение на МКП $U_0 = 800$ В и усиление в линейном режиме $M_0 = 1000$. Сопротивление R_1 принято равным 8×10^{10} Ом, а сопротивление $R_2 = 8 \times 10^{14}$ Ом, что соответствует току проводимости 10^{-12} А в расчете на один канал.

Поперечное сопротивление межканального промежутка определено путем интегрирования проводимости соединенных параллельно отдельных слоев диэлектрика:

$$R_3 = \frac{\rho}{L} \left(\frac{2h}{\sqrt{h^2 - d_k^2}} \arctg \sqrt{\frac{h + d_k}{h - d_k}} - \frac{\pi}{2} \right)^{-1}. \quad (2)$$

При этом продольное межканальное сопротивление выражается очевидным соотношением

$$R_4 = \rho L / (d_k h - 0,25 \pi d_k^2), \quad (3)$$

где ρ – удельное сопротивление. Для выбранных размеров канала при $h = 12$ мкм получаем $R_3 \approx$

$\approx 6,6$ Ом, $R_4 \approx 10^5 \rho$ Ом, где ρ выражено в Ом см. Резистивный слой каждого канала шунтируется сопротивлением $2R_4$, что вызывает увеличение тока проводимости. Пусть ток проводимости увеличивается не более чем на 3%. Тогда шунтирующее сопротивление должно удовлетворять условию $2R_4 \geq 30R_2$. Отсюда можно получить допустимые значения сопротивлений: $\rho \geq 10^{11}$ Ом см, $R_3 \geq 10^{12}$ Ом, причем равенство (минимальная величина сопротивления R_3) означает здесь максимальную степень связи между каналами.

Распределенная связь

Рассмотрим эффекты, обусловленные только распределенной связью между каналами, когда проводящая перемычка отсутствует и проводимость $1/R_c$ стремится к нулю.

На рис. 2 показаны зависимости относительно усиления 1- и 2-го каналов от сопротивления R_3 для двух режимов работы: для слабо нелинейного режима при $I_{in} = 2J_{in} = 2 \times 10^{-16}$ А и сильно нелинейного режима при $I_{in} = 2J_{in} = 10^{-15}$ А. Тогда при $R_3 \geq 10^{15}$ Ом усиление каналов от R_3 не зависит и каналы можно считать несвязанными. С увеличением степени связи коэффициенты усиления каналов сближаются: в канале с большим током усиление растет, в канале с меньшим током – падает. Этому сопутствует выравнивание распределений потенциала и напряженности электрического поля в обоих каналах. На рис. 3 показаны распределения напряженности поля в отсутствие связи и при максималь-

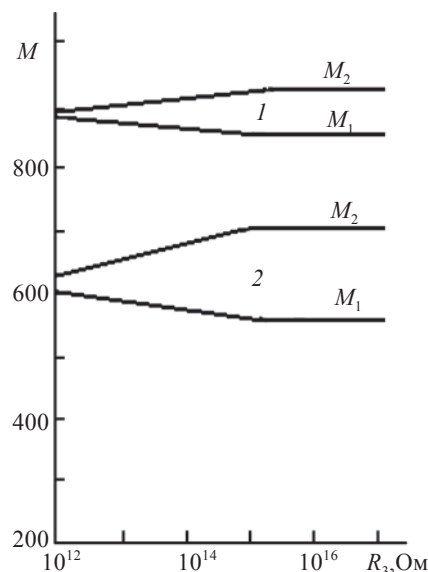


Рис. 2. Зависимости усиления связанных каналов от сопротивления межканального промежутка. 1 – $I_{in} = 2J_{in} = 2 \times 10^{-16}$ А, 2 – $I_{in} = 2J_{in} = 10^{-15}$ А.

но допустимой степени связи, когда $R_3 = 10^{12}$ Ом. При сильной связи цепочки резисторов r_2 обоих каналов (рис. 1) практически соединены параллельно, максимальная разность напряженностей поля на выходе каналов не превышает 3%. Это и приводит к выравниванию коэффициентов усиления каналов.

Выбранные режимы с двукратным перепадом тока на входах каналов соответствуют величине входного контраста [2]

$$Q_{in} = (I_{in} - J_{in}) / (I_{in} + J_{in}) = 1/3.$$

Определив подобным образом выходной контраст

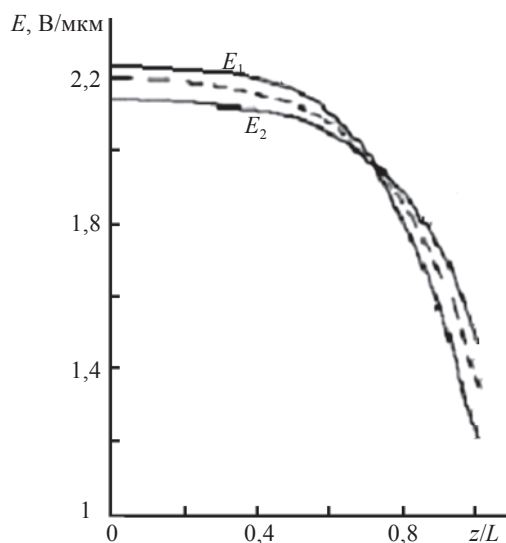


Рис. 3. Распределение напряженностей электрического поля в каналах. $I_{in} = 2J_{in} = 10^{-15}$ А. Обозначение сплошная линия – $R_3 = 10^{17}$ Ом, штриховая – $R_3 = 10^{12}$ Ом.

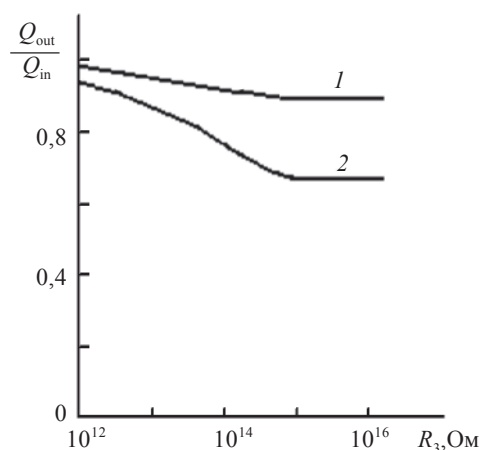


Рис. 4. Зависимости коэффициента передачи контраста от сопротивления межканального промежутка. 1 – $I_{in} = 2J_{in} = 10^{-15}$ А, 2 – $I_{in} = 2J_{in} = 2 \times 10^{-16}$ А.

$$Q_{out} = (M_1 I_{in} - M_2 J_{in}) / (M_1 I_{in} + M_2 J_{in}),$$

а коэффициент передачи контраста через связанные каналы представим отношением Q_{out}/Q_{in} . На рис. 4 показаны зависимости коэффициента передачи контраста от сопротивления R_3 . В отсутствие связи ($R_3 \geq 10^{15}$ Ом) снижение выходного контраста составляет 10 и 24% для двух рассматриваемых режимов работы каналов. При максимальной степени связи ($R_3 = 10^{12}$ Ом) снижение контраста становится минимальным – около 1 и 4% соответственно, что является следствием сближения коэффициентов усиления обоих каналов. Изменение исходных значений сопротивлений R_1 и R_2 или же геометрических размеров каналов и межканального промежутка, как показывают расчеты, сохраняют отмеченную тенденцию: большей степени связи соответствуют меньшие потери контраста.

Локальная связь

Рассмотрим влияние проводящей перемычки, предполагая, что распределенная связь отсутствует ($1/r_3 \rightarrow 0$). На рис. 5 показаны зависимости усиления двух каналов и коэффициент передачи контраста при двукратном перепаде тока на входе каналов в зависимости от положения перемычки ($j/n = z/L$) при различных значениях ее сопротивления. Если сопротивление $R_c \geq 10^{16}$ Ом, т. е. на один-два порядка больше продольного сопротивления R_2 резистивного слоя, то параметры каналов не зависят от положения перемычки и сосредоточенной связью каналов можно пренебречь (штриховые линии). Если

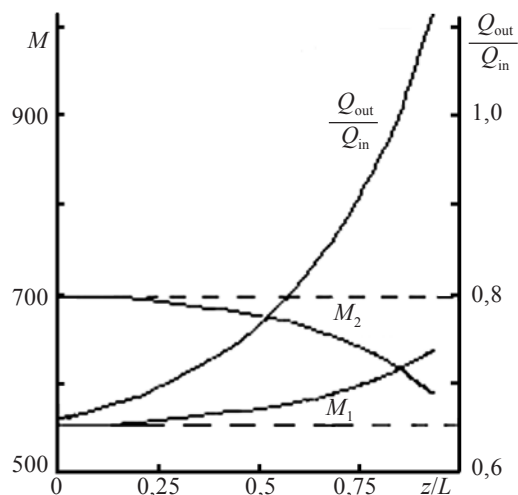


Рис. 5. Зависимости усиления каналов и коэффициента передачи контраста от положения проводящей перемычки. $I_{in} = 2J_{in} = 10^{-15}$ А, обозначение сплошной линией – при $R_c \leq 10^{12}$ Ом, штриховой – при $R_c \geq 10^{16}$ Ом.

же сопротивление $R_c \leq 10^{12}$ Ом, т. е., по крайней мере, на два-три порядка меньше, чем R_2 , и вплоть до короткого замыкания, то влияния перемычки на усиление каналов не проявляется при ее расположении во входной части канала ($z/L < 0,25$), т. е. каналы остаются практически не связанными. Смещение низкоомной перемычки (либо короткого замыкания) в сторону выхода каналов, как видно из рис. 5, сближает коэффициенты усиления каналов и снижает потери контраста при передаче перепада тока через каналы. Более того, при расположении перемычки вблизи выхода каналов ($z/L > 0,85$), возможно не ослабление, а усиление контраста на выходе. Очевидно, это связано со значительным изменением распределения потенциала в каналах за счет перетекания наведенного тока через малое сопротивление перемычки.

Заключение

Предложенный в работе подход к решению задачи передачи контраста изображения в системе взаимодействующих каналов позволяет учитывать различные эффекты, влияющие на распределение поля и усиление тока в канале.

Установлено, что дефекты МКП в виде проводящих перемычек между каналами не только не приводят к ухудшению контраста изображения, но и способствуют повышению контраста при их расположении вблизи выхода канала.

Увеличение степени распределенной резистивной связи между каналами МКП в пределах, ограниченных максимально допустимым током проводимости МКП, улучшает передачу контраста. Поэтому снижение удельного сопротивления межканальных промежутков может быть рекомендовано как средство снижения потери контраста изображения и расширения диапазона линейного усиления тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Estera P. and et. al.* Gated Power Supply Technologies for Advanced Image Intensifier // Proc. SPIE. 2003. V. 4796. P. 49–71.
2. *Bosch L.A.* Image intensifier tube performance is what matters // Proc. of SPIE. 2000. V. 4128. P. 65–78
3. *Беркин А.Б., Васильев В.В.* Математическое моделирование усиления тока в микроканальной пластине // Прикладная физика. 2006. № 2. С. 98–102.
4. *Берковский А.Г., Гаванин В.А., Зайдель И.Н.* Вакуумные фотоэлектронные приборы. М.: Радио и связь, 1988. 272 с.